

**Technische Universität Ilmenau**



**Fakultät für Informatik und Automatisierung**

**Institut für Biomedizinische Technik und Informatik**

**Übertragungsverhalten  
digitaler Röntgenbilderzeugungssysteme  
mit indirekter Bildwandlung:  
Methodische und experimentelle Analyse**

**DIPLOMARBEIT**

Vorgelegt von: **Qiaoqiao Hu**

Geboren am: 06.12.1982 in Peking (VR China)

Eingereicht am: 30.07.2010

Studiengang: Elektrotechnik und Informationstechnik

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Haueisen

Betreuer: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Keller

# Thesen

1. Gegenwärtig vollzieht sich in der Röntgendiagnostik ein Übergang von den analogen Film-Folien-Systemen zu den digitalen Röntgenbildwandlern.
2. Im Institut für Biomedizinische Technik stehen seit 2010 ein Speicherfoliensystem und ein Flachbilddetektor mit indirekter Bilderwandlung für Forschung und Lehre zur Verfügung
3. Um diese digitalen Bildwandler optimal in Lehre und Forschung nutzen zu können, ist die genaue Kenntnis ihrer Übertragungseigenschaften notwendig.
4. In der Arbeit werden die Möglichkeiten zur vollständigen Beschreibung des Übertragungsverhaltens zusammengestellt.
5. Zur experimentellen Ermittlung der Übertragungseigenschaften werden aus der Übertragungskette ein allgemeiner methodischer Ansatz und die Anforderungen an die Testeingänge und Sensoreigenschaften abgeleitet.
6. Die örtliche Dynamik lässt sich methodisch sowohl im Ortsbereich als auch im Ortsfrequenzbereich beschreiben.
7. Für die experimentelle Realisierung beider Möglichkeiten werden Testphantome verglichen. Im Ortsbereich ist die Kante einfach realisierbar. Im Ortsfrequenzbereich sind aber nur rechteckförmige Testraster möglich, wobei hier die Messergebnisse korrigiert werden müssen.
8. Die statischen Kennlinien der zwei Bildwandler (Speicherfoliensystem, Flachbilddetektor) zeigen Linearität.
9. Leeraufnahmen der beiden Bildwandler zeigen keine ideale Homogenität. Aber die Inhomogenität ist unabhängig von der Quantenenergie (Spannung) und von der Dosis (mAs-Produkt). Sie setzt sich zusammen aus Wandlerinhomogenitäten und Strahlenfeldinhomogenitäten.
10. Die örtliche Dynamik der beiden digitalen Röntgenbilderzeugungssysteme ist isotrop und isoplan.

11. Das Übertragungsverhalten der analogen und digitalen Wandlerstufe kann nicht separat gemessen werden. Die digitale Wandlerstufe ist der Messsensor zur Messung der analogen Wandlerstufe.
12. Zwei Messverfahren werden für die Bestimmung der örtlichen Dynamik mit der Modulationsübertragungsfunktion durchgeführt: Analyse von Kantenbildern und Analyse von Strichrasteraufnahmen.
13. Die Kante ist als Testobjekt geeignet.
14. Von den Testrastern ist nur der Gruppentest geeignet.
15. Mit Hilfe einer Phantomhalterung wird das Kantenphantom definiert schräg positioniert. Damit werden die Messwerte des Kantenbildes mit zusätzlichen Stützstellen im Subpixelbereich ergänzt.
16. Die Modulationsübertragungsfunktion wird mit Hilfe von einem mathematischen Modell analytisch erfasst.
17. Die Ergänzung mit den zusätzlichen Messwerten im Subpixelbereich führt zu einer genaueren Anpassung der mathematischen Modellfunktion.
18. Die Modellparameter können physikalischen Wechselwirkungsprozessen im Leuchtstoff zugeordnet werden.
19. Aus dem Vergleich der Rasteraufnahmen der Kantenbilder ergibt sich, dass die Kantenbilder besser geeignet sind für die quantitative Ermittlung und Analyse der Modulationsübertragungsfunktion.

# Danksagung

Ein besonders herzlicher Dank geht an meinen Betreuer Herrn Prof. Dr. Keller, der mich während der gesamten Diplomzeit mit nützlichen Vorschlägen und Hinweisen unterstützt hat.

Ein großer Dank gilt Frau MTRA Herzog für Ihre ständige Betreuung und Unterstützung im Röntgenlabor.

In diesem Rahmen möchte ich auch herzlich Frau Dr.-Ing. Jannek danken für die technische Hilfe bei der Gewinnung und Nutzung der Rohdatenbilder.

Ein weiteres Dankschön gilt Herrn Dipl.-Ing. Schawohl für die Unterstützung bei der Arbeit mit dem Röntgenmikroskopie-Gerät im Institut für Werkstoffwissenschaften der TU Ilmenau.

Meinen Eltern danke ich für ihre großzügige Unterstützung meines Studiums in Deutschland und für ihre unendliche Geduld.

# Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Relevanz .....	8
2	Übertragungsverhalten .....	9
2.1	Begriffe .....	9
2.2	Vollständige Beschreibung .....	9
2.3	Statisches Verhalten .....	9
2.3.1	Kennlinientypen .....	9
2.3.2	Kontrast .....	11
2.3.3	Einflussfaktoren .....	12
2.3.4	Kontrastübertragung .....	14
2.4	Örtliche Dynamik .....	15
2.4.1	Charakteristik .....	15
2.4.2	Systemeigenschaften .....	16
2.4.3	Beschreibungsansatz .....	17
2.4.4	Beschreibungsmöglichkeiten .....	19
2.4.5	Zerlegung in 2D-Diracimpulse .....	19
2.4.6	Zerlegung in 2D-Sinusschwingungen .....	21
2.5	Kennfunktionen .....	25
2.5.1	Punktbild, Linien- und Kantenbild .....	25
2.5.2	Modulationsübertragungsfunktion .....	26
2.5.3	Zusammenhänge .....	28
2.6	Übertragungskette und Ansatz .....	29
3	Präzisierte Aufgabenstellung .....	32

4	Eingangstestsignale, Testobjekte .....	33
4.1	Aperiodische Eingangstestsignale.....	33
4.1.1	Lochblende, Linienblende .....	33
4.1.2	Kante.....	33
4.2	Periodische Eingangstestsignale.....	34
4.3	Bleistrichraster.....	35
4.3.1	Aufbau, Arten .....	35
4.3.2	2D-Rechteckschwingung.....	37
4.3.3	Ideale Bleistrichraster.....	41
4.3.4	Reale Bleistrichraster .....	44
4.3.5	Berechnung der Modulationsübertragungsfunktion .....	49
4.3.6	Optimales Bleistrichraster .....	52
5	Experimentelle Untersuchungen .....	54
5.1	Speicherfoliensystem .....	54
5.1.1	Aufbau.....	54
5.1.2	Übertragungseigenschaften .....	56
5.1.3	Besonderheiten indirekter digitaler Röntgenbildwandler .....	67
5.1.4	Analyse von Kantenbildern.....	69
5.1.5	Analyse von Rasteraufnahmen .....	77
5.1.6	Vergleich der Modulationsübertragungsfunktionen .....	80
5.2	Digitaler Flachbilddetektor.....	81
5.2.1	Aufbau.....	81
5.2.2	Übertragungseigenschaften .....	83
5.2.3	Analyse von Kantenbildern.....	90
5.2.4	Analyse von Rasteraufnahmen .....	95
5.2.5	Vergleich der Modulationsübertragungsfunktionen .....	98
5.3	Physikalische Interpretation der Kennfunktionen.....	99

6	Zusammenfassende Bewertung.....	101
7	Hinweise zur weiteren Themenbearbeitung .....	103
	Abkürzungsverzeichnis .....	105
	Literaturverzeichnis.....	106
	Anlagen.....	108
	Eidesstattliche Erklärung.....	125

# 1 Motivation und Relevanz

Röntgenbilderzeugungssysteme werden in Deutschland jährlich bei über 100 Millionen Röntgenuntersuchungen eingesetzt. Sie sind die technische Voraussetzung der Röntgendiagnostik, einem wichtigen Teil der bildgebenden Diagnostik. Das System besteht aus einem Röntgenstrahlenerzeuger, einem Bildempfangssystem (Bildwandler) und dem Röntgenanwendungsgerät (Stative, Tische, u.a.). Der Bildwandler löst die Hauptaufgabe, ein unsichtbares latentes Strahlenbild in ein sichtbares Bild zu wandeln. Das Übertragungsverhalten des Bildwandlers beeinflusst direkt die Bildqualität.

Dem Institut für Biomedizinische Technik der TU Ilmenau stehen seit diesem Jahr zwei moderne digitale Bildwandler von den Firmen Kodak und VARIAN zur Verfügung: Ein Speicherfoliensystem und ein Flachbilddetektor. Die beiden Bildwandler sollen künftig in der Lehre (Studentenpraktikum im Masterstudiengang Biomedizinische Technik) und in der Forschung (Bildgütemesslabor) genutzt werden. Mit den digitalen Röntgenbilderzeugungssystemen kann deren Übertragungsverhalten direkt gemessen werden. So ergeben sich neue Möglichkeiten, die Anteile der Übertragung von Bildsignalen mit geeigneten Phantomen, Methoden und Kennfunktionen quantitativ zu beschreiben.

Die Homogenität der Bildwandler wird zuerst geprüft. Dann werden das statische Verhalten und die Invarianzen der Übertragungseigenschaften getestet. Schließlich wird die Modulationsübertragungsfunktion zur Beschreibung der örtlichen Dynamik ermittelt. Es gibt zwei Messverfahren für die Ermittlung der Modulationsübertragungsfunktion: Einmal über die Analyse des Kantenbildes und zum anderen über die Auswertung von Strichrasteraufnahmen. Die beiden Verfahren werden experimentell getestet und die Ergebnisse miteinander verglichen.



## **2 Übertragungsverhalten**

### **2.1 Begriffe**

Das Übertragungsverhalten beschreibt den komplexen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen und -signalen von Bildwandlern. Es gibt zwei Prozessebenen der Übertragung. In der physikalischen Ebene wird der Energieübertragungsprozess beschrieben. In der technischen Ebene wird die Signal- und Informationsübertragung berücksichtigt. In dieser Diplomarbeit wird nur das Signalübertragungsverhalten methodisch und experimentell untersucht, wie die zeit- und/oder ortsabhängigen Eingangssignale zum Ausgangssignal umgewandelt werden. Das Signal trägt die Information. Es wird als eine zeitliche und/oder örtliche Schwankung um den Mittelwert gesehen.

### **2.2 Vollständige Beschreibung**

Um ein Übertragungsverhalten vollständig zu beschreiben, werden die Koordinatentransformation und Signaltransformation berücksichtigt. Die Koordinatentransformation beschreibt die Übertragung zwischen dem Objektraum und der Bildebene. Für die Übertragung in der Bildebene ist die Signaltransformation verantwortlich. Das statische Verhalten, die zeitliche und örtliche Dynamik, die Störgrößen und das Rauschen gehören zum Signalübertragungsverhalten.

### **2.3 Statisches Verhalten**

#### **2.3.1 Kennlinientypen**

Bildgebende Systeme werden immer in Großsignalaussteuerung betrieben. Das statische Verhalten charakterisiert dabei die Übertragung des Arbeits-

punktes selbst. Sowohl für den Ort als auch für die Zeit beschreibt das statische Verhalten den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignal. Um das statische Verhalten zu untersuchen, wird ein orts- und zeitinvariantes Signal am Eingang angelegt. Am Ausgang muss so lange gewartet werden, bis der zeitliche Ausgleichsvorgang abgeschlossen ist. Das dynamische Verhalten ist unterschiedlich für Ort und Zeit. Für das statische Verhalten gibt es nur eine statische Kennlinie. Drei verschiedene Kennlinientypen zeigen die Abbildung 1. Jedem Kennlinientyp wird ein Bildwandler als Beispiel zugeordnet.

Kennlinientyp 1 zeigt globale Linearität. Die Linie geht vom Koordinatenursprung aus und steigt linear an bis zu einem gewissen Punkt. Dann wird der Sättigungsbereich erreicht. Alle Bildwandler (z.B. Speicherfolie, Flachbilddetektor) mit Leuchtstoffen entsprechen einem solchen Verlauf. Kennlinientyp 2 zeigt den typischen Verlauf vom Röntgenfilm in Film - Folien - Systemen. Bei einer Belichtung mit sichtbarem Licht muss die Eingangsgröße einen bestimmten Schwellwert  $e_s$  erst überschreiten, damit ein Ausgang  $a > 0$  erscheint. Kennlinientyp 3 beschreibt ein System, bei dem das Ausgangssignal ein Dunkelanteil ( $a_d > 0$ ) zeigt, obwohl kein Eingangssignal vorhanden ist. Beispiele hierfür sind der äußere oder innere lichtelektrische Effekt. Dies ist der Kennlinientyp 3 [2].

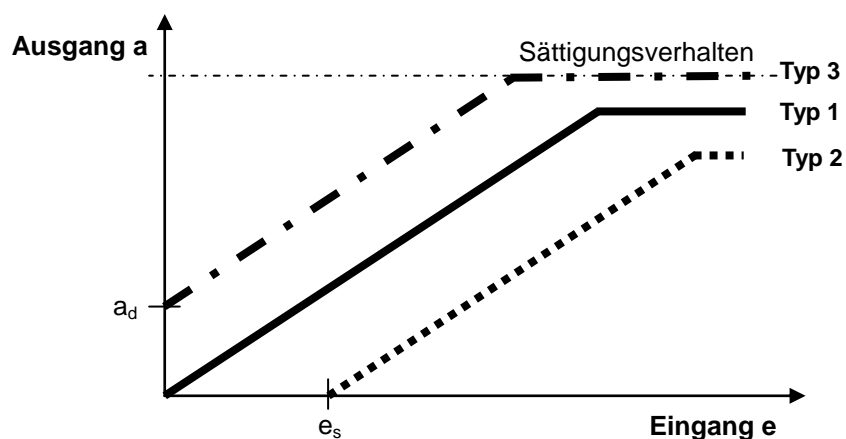


Abbildung 1: Kennlinientypen des statischen Verhaltens [14]

### 2.3.2 Kontrast

Das menschliche Auge kann keine Amplituden wahrnehmen, sondern es kann nur Kontraste  $k$  sehen. Deshalb wird der Kontrast zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens der bildgebenden Systeme eingeführt. Es handelt sich um das Verhältnis zwischen z.B. der Leuchtdichte  $I$  einer helleren Region und einer benachbarten dunkleren Region. Mathematisch gesehen ist der Kontrast benachbarter Bild- bzw. Objektregionen gleich dem Quotienten aus Amplitude der beiden Bildsignalwerte  $I_A = (I_2 - I_1) / 2$  und des Mittelwerts  $I_m = (I_1 + I_2) / 2$ . Der Zahlenwert des Kontrasts liegt immer zwischen Null und Eins.

$$k = \frac{I_A}{I_m} = \frac{I_2 - I_1}{2} \cdot \frac{2}{I_1 + I_2} = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \quad (1)$$

Die Röntgenstrahlen fallen mit der Intensität  $I_0$  auf ein schwächendes Objekt ein. Die einfallende Strahlenintensität  $I_0$  wird durch das Objekt geschwächt. Die Schwächung der Röntgenstrahlung ist abhängig von der Dicke des Objekts und dem Material. Das Schwächungsgesetz lautet:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \quad (2)$$

Dabei ist  $\mu$  der lineare Schwächungskoeffizient  $d$  ist die Dicke der durchstrahlten Materialschicht.  $I_0$  bezeichnet die einfallende Strahlenintensität.  $I$  ist die austretende Strahlenintensität. Setzt man das Schwächungsgesetz in der Gleichung 2 ein, folgt für die benachbarten Strahlenintensitäten:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-(\mu_0 \cdot D + \mu_1 \cdot d)} \quad \text{und} \quad I_2 = I_0 \cdot e^{-(\mu_0 \cdot D + \mu_2 \cdot d)} \quad (3)$$

Für den Kontrast  $k$  im latenten Strahlenbild, ergibt sich mit  $I_1$  und  $I_2$  folgende Beziehung:

$$k_e = \frac{e^{-\mu_2 \cdot d} - e^{-\mu_1 \cdot d}}{e^{-\mu_2 \cdot d} + e^{-\mu_1 \cdot d}} \quad (4)$$

In der Abbildung 2 wird der Kontrast eines periodisch schwächenden Objektes dargestellt

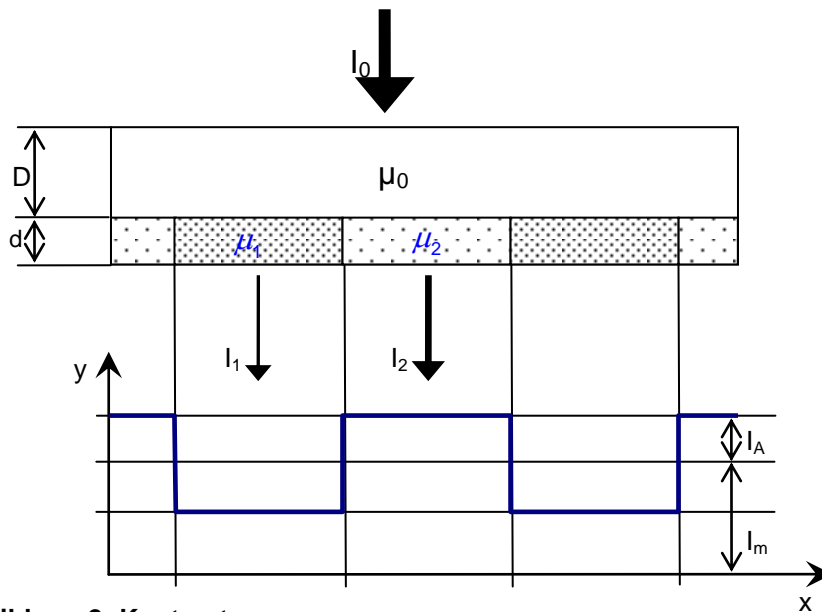


Abbildung 2: Kontrast

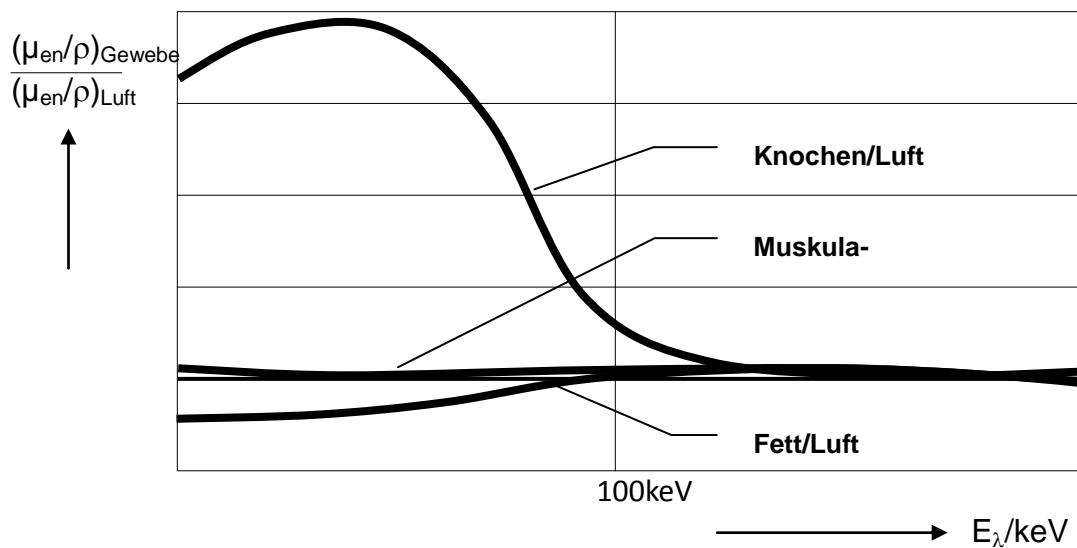
### 2.3.3 Einflussfaktoren

Der Strahlenbildkontrast ist der Eingangskontrast  $k_e$  für den Röntgenbildwandler. Die Einflussgrößen auf den Eingangskontrast  $k_e$  sind nur die Dicke  $d$  der unterschiedlich schwächenden Schichten und der Unterschied der linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu_1$  und  $\mu_2$ . Der Strahlenbildkontrast ist unabhängig

- von der einfallenden Intensität  $I_0$
- von der Dicke  $d$  homogen schwächender Schichten (ohne Streuung)
- vom Schwächungskoeffizienten  $\mu_0$  homogen schwächender Schichten.

Die unterschiedlich schwächende Schicht hat die gleiche Dicke  $d$ . Der Eingangskontrast wird nun als Unterschied der Schwächungseigenschaften des durchstrahlten Objekts angesehen. Die linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu$  sind abhängig von der Ordnungszahl  $Z$ , der Dichte  $\rho$  sowie von der Quantenenergie  $h \cdot \nu$  und damit von der Röntgenröhrenspannung  $U$ . Mit steigender Röntgenröhrenspannung  $U$  verringern sich die Unterschiede zwischen den Schwächungskoeffizienten des verschiedenen Materials immer mehr. Und entsprechend ist auch ein abnehmender Kontrast schon im latenten Strahlenbild zu erwarten. In der Röntgendiagnostik muss die Röntgenröhrenspannung

optimal angepasst werden, um einen großen Kontrast zu erreichen. In der Abbildung 3 wird dies graphisch verdeutlicht. Ab 100 keV ist der Kontrast der verschiedenen menschlichen Körpergewebe kaum unterschiedlich. Die Massenenergieabsorptionskoeffizienten  $\mu_{\text{en}}/\rho$  für unterschiedliche Körpergewebe bezogen auf den für Luft wird in Abhängigkeit von der Quantenenergie  $E_\lambda$  (und damit von der Röhrenspannung  $U$ ) dargestellt [3].



**Abbildung 3: Energieabhängigkeit der Wechselwirkungskoeffizienten [14]**

Der Ausgangskontrast berechnet sich analog zum Eingangskontrast aus dem maximalen und minimalen Signalwert nach der Bildwandlung. Im digitalen bildgebenden System lassen sich die verschiedene Leuchtdichtewerte eindeutig Pixelwerten örtlich zuordnen. Das Pixel ist die kleinste örtliche Einheit im Bild. Der Bildkontrast  $k$  wird allgemein berechnet:

$$k_a = \frac{S_o - S_u}{S_o + S_u}$$

$S_o$ : oberer Signalwert,  $S_u$ : unterer Signalwert (5)

Die Amplitude ergibt sich als Halbe Differenz zwischen oberem Signalwert  $S_o$

und unterem Signalwert  $S_u$  zu  $A = S_o - S_u$ . Der Mittelwert ist gleich die Hälfte der Summe von beiden Signalwerten und ergibt sich zu  $m = (S_o + S_u) / 2$ . Jeder Bildwandler zeigt einen bestimmten Typ des Kontrastübertragungsverhaltens, wie in Abbildung 1 dargestellt.

### 2.3.4 Kontrastübertragung

Die Übertragung zwischen Eingangs- und Ausgangskontrast wird durch den Kontrastübertragungsfaktor KÜF beschrieben. Die statische Kennlinie 3 aus der Abbildung 1 wird als ein Beispiel genommen, um den Kontrastübertragungsfaktor zu erklären. Ein Arbeitspunkt wird im linearen Bereich der Kennlinie 3 festgelegt. Das System wird um diesen Arbeitspunkt in einem festgelegten Aussteuerbereich betrieben.  $E$  ist die Amplitude des Eingangssignals,  $A$  ist die Amplitude des Ausgangssignals,  $m_e$  ist der Mittelwert des Eingangssignals und  $m_a$  der Mittelwert des Ausgangssignales.

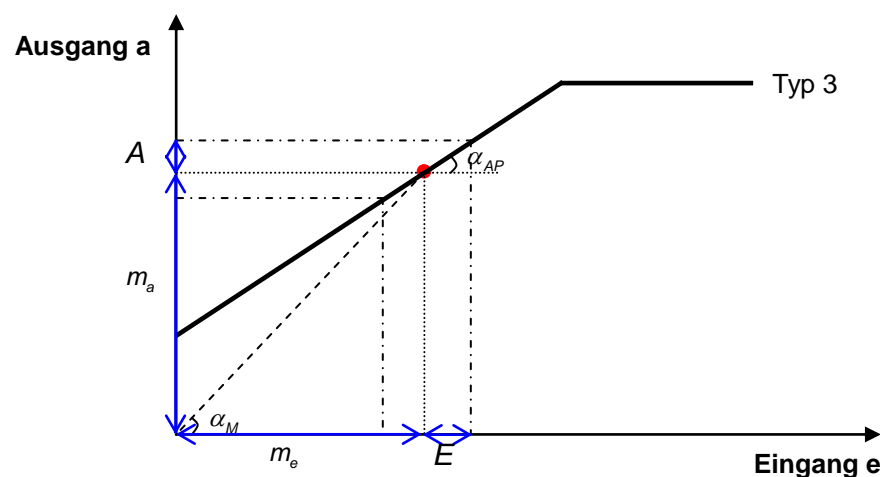


Abbildung 4: Kontrastübertragung [2]

Der Winkel  $\alpha_{AP}$  ist der Anstieg der statischen Kennlinie im Arbeitspunkt. Der Winkel  $\alpha_M$  ist der Anstieg der Verbindungslinie vom Koordinatenursprung zum Arbeitspunkt. Daraus ergeben sich die Tangensfunktionen:

$$\tan(\alpha_{AP}) = \frac{A}{E} \quad \tan(\alpha_M) = \frac{m_a}{m_e} \quad (6)$$

Für den Eingangs- und Ausgangskontrast nach Gleichung 1 gilt:

$$k_e = \frac{E}{m_e} \quad k_a = \frac{A}{m_a} \quad (7)$$

Daraus ergibt sich für den Kontrastübertragungsfaktor:

$$KÜF = \frac{KÜF_a}{KÜF_e} = \frac{\tan(\alpha_{AP})}{\tan(\alpha_M)} \quad (8)$$

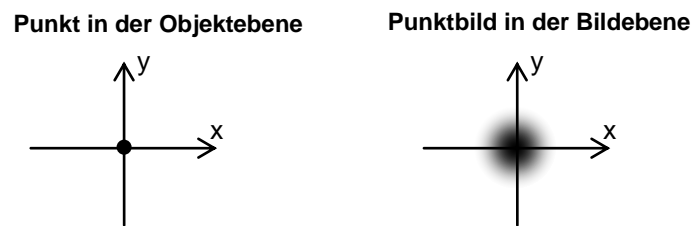
Der Kontrastübertragungsfaktor hat den Wert Eins für alle Bildwandler des Kennlinientyps 1 (z.B. Leuchtstoffe in Speicherfolie, Flachbilddetektor). Die Wandler des Kennlinientyps 2 haben einen Faktor größer als Eins (Film - Folien - Systeme). Bei Systemen des Kennlinientyps 3 (lichtelektrischer Effekt) ist der Faktor immer kleiner Eins [2].

## 2.4 Örtliche Dynamik

### 2.4.1 Charakteristik

Ein bildgebendes System, gleich welchen Typs, hat keine Möglichkeit, am Ausgang sprungförmigen Änderungen des Eingangssignals längs der Ortskoordinaten zu folgen. Energietransportprozesse sind dafür verantwortlich. Die Energie der Röntgenquanten wird stufenweise auf die Detektorsubstanz übertragen (Energiedegradation). Und die Energie wird dabei auf viele kleine Einzelportionen verteilt (Energiedissipation). Dabei werden diese Prozesse immer begleitet von Änderungen der Ausbreitungsrichtung der Energieträger (Röntgenstreuquanten, Sekundärelektronen, Lichtquanten etc.). Nicht nur am initialen Auftreffort, sondern auch in dessen Umgebung wird stets Energie deponiert. Das Eingangssignal an einer bestimmten Ortskoordinate hat nicht nur Einfluss auf das Ausgangssignal derselben Ortskoordinate in der Bildebene,

sondern auch auf alle anderen in deren örtlicher Umgebung. Z.B. ein Punktsignal in der Objektebene wird in der Bildebene als Scheibchen abgebildet.



**Abbildung 5: Punkt in der Objekt- und Punktbild in der Bildebene**

Für ein solches, stets von den Signalwerten der Nachbarschaft beeinflusstes örtliches Übertragungsverhalten muss ein Operator gesucht werden, welcher einem zweidimensionalen Eingangssignal  $e(x, y)$  ein zweidimensionales Ausgangssignal  $a(x, y)$  zuordnen kann. Abbildung 6 zeigt das vereinfachte Modell für die Beschreibung des Übertragungsverhaltens.



**Abbildung 6: Bilderzeugungssystem mit Eingangs- und Ausgangssignal**

In dieser Diplomarbeit werden solche Operatoren genutzt, wobei das System vereinfacht immer als linear, stationär und separierbar angenommen wird.

## 2.4.2 Systemeigenschaften

Ein lineares Abbildungssystem ist ein System, bei dem das Bild zweier beliebiger additiv zusammengesetzter Objektverteilungen gleich ist der Addition der separaten Bilder. Die von jeder der beiden Objektverteilungen allein unter den gleichen Bedingungen erzeugt werden [1]. Um die Zuordnung von  $a(x, y)$  und  $e(x, y)$  bei linearen System zu beschreiben, wird ein Operator ( $\mathcal{B}$ ) mathematisch für alle reellen Zahlen  $\alpha \geq 0$  so formuliert [2]:



- Additivität:  $\mathcal{G}\{e_1 + e_2\} = \mathcal{G}\{e_1\} + \mathcal{G}\{e_2\}$
- Homogenität:  $\mathcal{G}\{a \cdot e_1\} = a \cdot \mathcal{G}\{e_1\}$
- Linearität:  $\mathcal{G}\left\{\sum_i a_i \cdot e_i\right\} = \sum_i a_i \cdot \mathcal{G}\{e_i\}$

Ein lineares Röntgenbilderzeugungssystem wird so interpretiert, dass an jeder Stelle die Änderung der Dosisverteilung im Strahlenbild proportional zu einer Leuchtdichteänderung im Bild mit dem gleichen Faktor ist. Es gilt uneingeschränkt das Additivitätsprinzip.

Ein System, dessen Übertragungseigenschaften ortsunabhängig, also verschiebungsinvariant ist, nennt man isoplan. Sind seine Eigenschaften richtungsunabhängig, also verdrehungsinvariant, nennt man es isotrop. Die Übertragungsfunktion ist nicht abhängig von Ort und Richtung. Das Übertragungssystem zeigt hinsichtlich solcher Änderungen Stationarität.

### 2.4.3 Beschreibungsansatz

Wie oben Abbildung 5 gezeigt hat, wird ein Punkt am Ausgang eines bildgebenden Systems als Scheibchen erscheinen. Ein punktförmiges Objekt wird durch einen zweidimensionalen Diracimpuls beschrieben. Der 2D-Diracimpuls ist ein Elementarsignal. Es ist eine Distribution und wie folgt definiert:

Der 2D-Diracimpuls existiert nur im Koordinaten Ursprung:

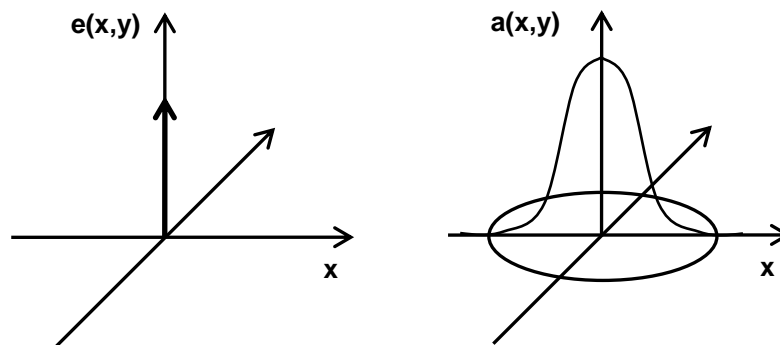
$$\delta(x, y) = 0 \quad \forall x, y \neq 0$$

Sein Integral über die gesamte Bildebene ist Eins:

$$\iint \delta(x, y) dx dy = 1$$

Jedes beliebige 2D-Signal kann verlustfrei in 2D-Diracimpulse zerlegt werden (genaue Beschreibung siehe 2.4.5). Ein 2D-Diracimpuls als Eingangssignal eines linearen Systems erzeugt am Ausgang die Gewichtsfunktion. Die zweidimensionale Gewichtsfunktion ist glockenförmig (siehe Abbildung 7). Sie wird

synonym auch als Punktbildfunktion (PSF; point spread function) bezeichnet.



**Abbildung 7: 2D-Diracimpuls in der Objektebene (links); Punktbild in der Bildebene**

Mit dem heuristischen Ansatz wird der Übertragungsprozess eines 2D-Diracimpulses beschrieben:

$$a(x, y) = g(\tilde{x}, \tilde{y}) ** e(\tilde{x}, \tilde{y}) = g(\tilde{x}, \tilde{y}) ** \delta(\tilde{x}, \tilde{y}) = g(x, y) \quad (9)$$

Der Eingang  $e(\tilde{x}, \tilde{y})$  ist das normierte Elementarsignal, der 2D-Diracimpuls  $\delta(\tilde{x}, \tilde{y})$  im lokalen Koordinatensystem  $(\tilde{x}, \tilde{y})$ . Die Gewichtsfunktion  $g(\tilde{x}, \tilde{y})$  in den lokalen Koordinaten ist die Systemantwort auf den idealen Punkt. Diese wird in beliebige Orte verschoben und dort mit dem Eingangssignal multipliziert. Um die von Nachbarschaft beeinflusste Information zu sammeln wird das Faltungsintegral verwendet. Durch Überlagerung aller elementaren Ausgänge erhält man das komplette Ausgangssignal. Mathematisch wird es so beschrieben:

$$a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x - \tilde{x}, y - \tilde{y}) \cdot e(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x} d\tilde{y} \quad \text{bzw.} \quad a = g ** e \quad (10)$$

Neben dem 2D-Diracimpuls können auch 2D-Sinusschwingungen jeden beliebigen Eingang verlustfrei zerlegen. Hierzu wird die Gewichtsfunktion, das Eingangs- und Ausgangssignal fouriertransformiert. Danach ergeben sich im Ortsfrequenzbereich die Übertragungsfunktion  $G(f_x, f_y)$  (OTF, optical transfer function), das komplexe Eingangsortsfrequenzspektrum  $E(f_x, f_y)$  und das kom-

plexe Ausgangsortsfrequenzspektrum  $A(f_x, f_y)$ . Das Faltungsintegral wird durch eine einfache punktweise Multiplikation ersetzt.

$$A(f_x, f_y) = G(f_x, f_y) \cdot E(f_x, f_y) \quad \text{mit} \quad G(f_x, f_y) = F\{g(x, y)\} \quad (11)$$

#### 2.4.4 Beschreibungsmöglichkeiten

Es gibt zwei Möglichkeiten, um das örtliche dynamische Verhalten bildgebender Systeme zu beschreiben. Eine Möglichkeit ist die direkte Beschreibung des bildgebenden Systems mit der Gewichtsfunktion  $g(x, y)$  im Ortsbereich als Lösung einer Differentialgleichung n-ter Ordnung. Da die örtliche Dynamik aber nicht als Folge energiespeichernder Übertragungsglieder entsteht, sondern als Folge von Streuprozessen im Bildwandler, scheidet diese Möglichkeit aus. Eine zweite Möglichkeit ist die Zerlegung des Eingangssignals in Elementarsignale. Am Ende werden die elementaren Ausgangssignale wieder zum Ausgangssignal zusammengesetzt. Folgende Abbildung zeigt den Übertragungsprozess des Signals. Die Übertragung des normierten Elementarsignals muss experimentell ermittelt werden [2].

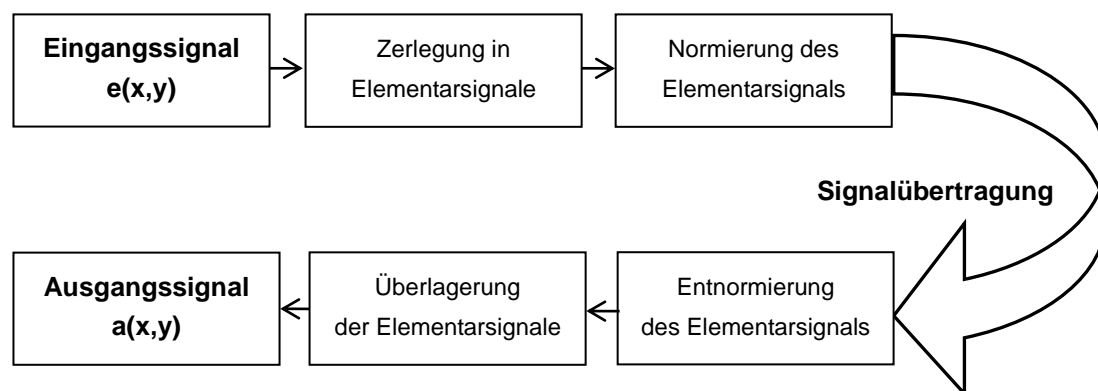


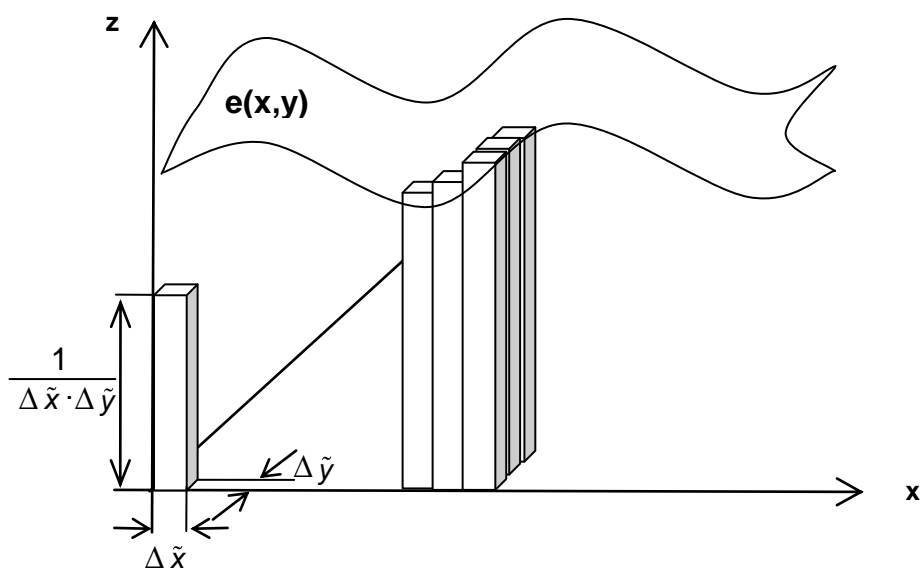
Abbildung 8: Übertragungsprozess des Signals

#### 2.4.5 Zerlegung in 2D-Diracimpulse

Im Abschnitt 2.4.3 wurde schon beschrieben, dass der 2D-Diracimpuls ein

solches ideales Elementarsignal ist. Er kann verlustfrei jedes beliebige 2D-Signal zerlegen. Der in der obigen Abbildung dargestellte Übertragungsprozess wird im folgenden Abschnitt mathematisch erklärt.

Die Grundfläche des 2D-Diracimpuls ist infinitesimal klein. Sein Volumen ist auf Eins normiert. Damit wird seine Höhe ist unendlich groß. Zur Einführung des 2D-Diracimpulses dient der normierter Balken  $\Delta(\tilde{x}, \tilde{y})$ . Der Balken hat eine Grundfläche  $\Delta\tilde{x} \cdot \Delta\tilde{y}$  und eine Höhe  $1/(\Delta\tilde{x} \cdot \Delta\tilde{y})$ . Das Volumen des Balkens ist Eins. Der Balken kann in jeden Ort verschoben  $(x-i \cdot \Delta\tilde{x}, y-j \cdot \Delta\tilde{y})$  werden. Ein beliebiges Signal  $e(x,y)$  soll von Balken approximiert werden. Dazu wird er verschoben und sein Volumen mit dem tatsächlichen am selben Ort multipliziert. Die Summe über alle Balken approximiert das vollständige Signal. Die folgende Abbildung zeigt diesen Ansatz.



**Abbildung 9: Zerlegung in 2D-Balken**

Die Balken dürfen sich weder überlagern noch dürfen Lücken auftreten. Die Verschiebung erfolgt also in ganzzahligen Vielfachen um  $i \cdot \Delta\tilde{x}$  und  $j \cdot \Delta\tilde{y}$ . Um die Approximationsgenauigkeit zu erhöhen, wird die Balkengrundfläche infinitesimal klein gemacht. Die mathematische Beschreibung des Balkens wird dabei geändert:  $\Delta\tilde{x} \rightarrow d\tilde{x}$  und  $\Delta\tilde{y} \rightarrow d\tilde{y}$ . Aus dem normierten Balken wird der Diracimpuls. Die schrittweise Balkenverschiebung  $i \cdot \Delta\tilde{x}$  und  $j \cdot \Delta\tilde{y}$  wird durch

die kontinuierlichen Variablen  $\tilde{x}$  und  $\tilde{y}$  ersetzt. Danach kann ein beliebiges Eingangssignal durch die Superposition von elementaren Eingangssignalen mit dem Faltungsintegral beschrieben werden:

$$e(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - \tilde{x}, y - \tilde{y}) \cdot e(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x}d\tilde{y} \quad (12)$$

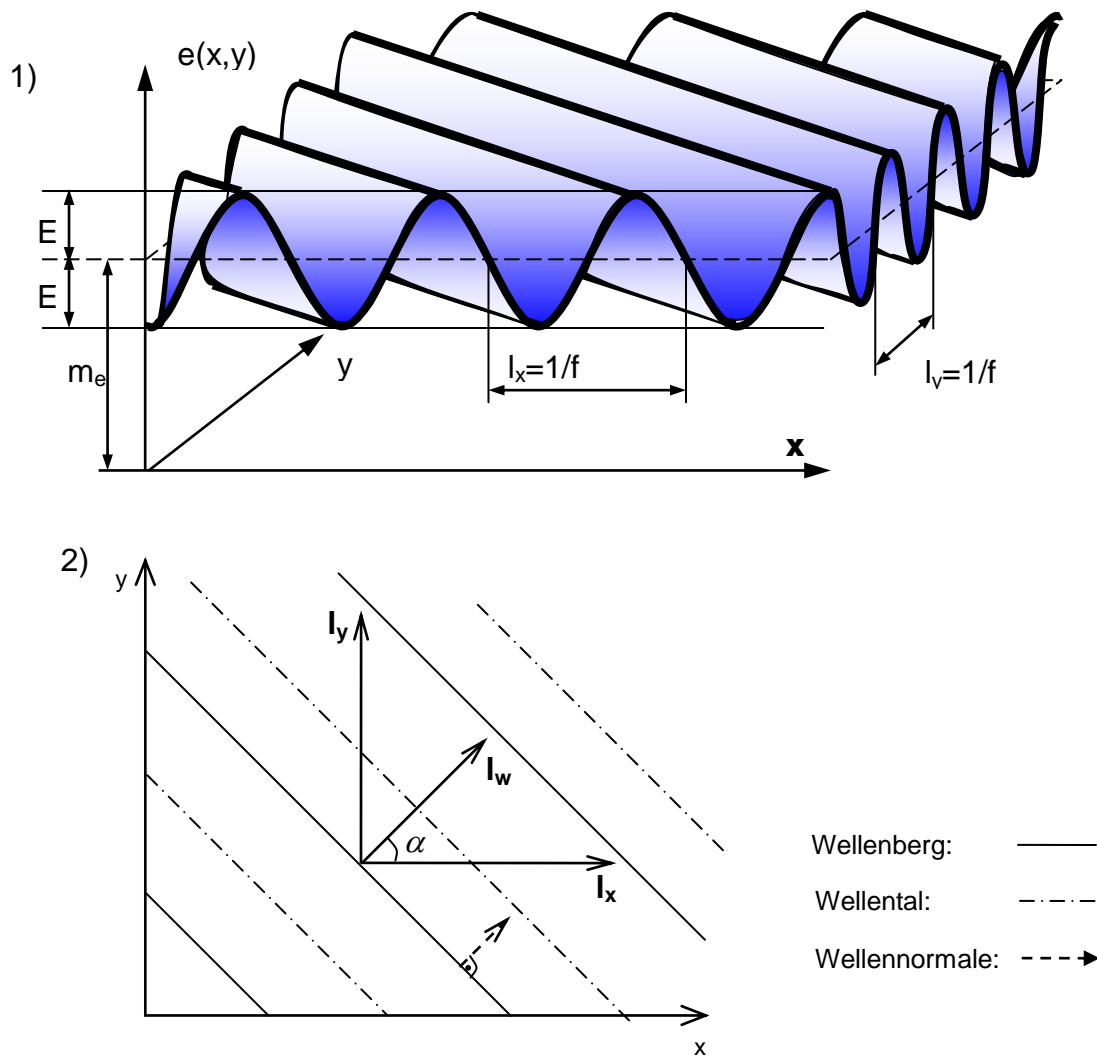
Wie die Gleichung 12 zeigt, ergibt die Faltung eines beliebigen Signals mit dem Diracimpuls das Signal selbst. Somit kann jedes Eingangssignal ohne Informationsverlust zerlegt werden. Falls ein Diracimpuls am Eingang eines Systems liegt, wird das Übertragungsverhalten mit Gleichung 9 nach dem Ansatz in 2.4.3 beschrieben:

$$a(\tilde{x}, \tilde{y}) = g(x, y) ** \delta(x, y) = g(x, y) \quad (13)$$

Das Ausgangssignal als Systemantwort auf den Diracimpuls ist die Gewichtsfunktion  $g(x, y)$ . Die Gewichtsfunktion beschreibt das örtliche Übertragungsverhalten vollständig. Bei bekannter Gewichtsfunktion kann das Ausgangssignal aus dem Eingangssignal mit dem Faltungsintegral berechnet werden.  $a(x, y) = g(x, y) ** e(x, y)$ .

## 2.4.6 Zerlegung in 2D-Sinusschwingungen

Fourier erkannte, dass ein beliebiges aperiodisches Signal aus Sinusschwingungen mit verschiedener Amplitude, Frequenz und Phase zusammengesetzt werden kann. Umgekehrt kann ein beliebiges Signal in Sinusschwingung zerlegt werden. Eine zweidimensionale Schwingung ist eine Wellblechtafel und liegt im Raum mit seinem Mittelwert äquidistant zur x-y Ebene.



**Abbildung 10: 2D-Sinusschwingung : 1) Seitenansicht, 2) Draufsicht [2]**

Dabei ist  $l_w$  die Wellenlänge entlang die Richtung der Wellennormalen. Nach Zerlegung der Wellenlänge in X und Y-Richtung ergibt sich daraus:

$$l_x = \cos(\alpha) \cdot l_w \quad \text{und} \quad l_y = \sin(\alpha) \cdot l_w \quad (14)$$

Der umgekehrte Wert der Wellenlänge ist die Frequenz. Das Signal ist nicht zeitlich sondern örtlich variabel. Deshalb spricht man hier von der Ortsfrequenz  $f_w$ . Die Einheit ist 1/mm. Anhand die Gleichung 14 ergibt sich für die Ortsfrequenz in der X- und Y-Richtung:

$$f_x = \cos(\alpha) \cdot f_w \quad \text{und} \quad f_y = \sin(\alpha) \cdot f_w \quad (15)$$

Nach mathematischer Umformung gilt:

$$\cos \alpha = \frac{l_w}{l_x} = \frac{f_x}{f_w} \quad \text{und} \quad \sin \alpha = \frac{l_w}{l_y} = \frac{f_y}{f_w} \quad (16)$$

Auf der Grundbeziehung von Winkelfunktion ergibt sich die Zusammenhang zwischen den Ortsfrequenzanteilen:

$$f_w = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad \text{mit} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right) \quad (17)$$

Somit gilt für die 2D-Sinusschwingung die Beziehung:

$$e(x, y) = m_e + E \cdot \cos\left[2\pi(f_x \cdot x + f_y \cdot y) - \varphi_e\right] \quad (18)$$

Der Mittelwert am Eingang ist  $m_e$ , die Eingangsamplitude ist  $E$ , die Phasenverschiebung der 2D-Sinusschwingung am Eingang ist  $\varphi_e$ . Wird die Formel 18 auf den Mittelwert normiert, erhält man die Gleichung der 2D-Sinusschwingung im Ortsbereich am Eingang zu:

$$e(x, y) = 1 + k_e \cdot \cos\left[2\pi(f_x \cdot x + f_y \cdot y) - \varphi_e\right] \quad (19)$$

Der Kontrast von der 2D-Sinusschwingung ist  $k_e$ . Mit Hilfe der Fouriertransformation kann man ein zwei dimensionales Signal in 2D-Sinusschwingungen zerlegen.

$$e(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(f_x, f_y) \cdot e^{+i2\pi(f_x \cdot x + f_y \cdot y)} df_x df_y \quad (20)$$

Dabei ist  $e(x, y)$  das ortsabhängige Signal und  $E(f_x, f_y)$  das komplexe Ortsfrequenzspektrum im Ortfrequenzbereich.

Wie bereits gezeigt, kann man bei linearen Systemen das Faltungsintegral nutzen, um das Übertragungsverhalten zu beschreiben. Dies gilt auch dann, wenn eine 2D-Sinusschwingung am Eingang liegt. Dann ergibt sich am Ausgang:

$$a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x - \tilde{x}, y - \tilde{y}) \cdot e(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x} d\tilde{y} \quad (21)$$

Wobei  $e(\tilde{x}, \tilde{y})$  die 2D-Sinusschwingung ist. Nach der mathematischen Her-

leitung führt das Ergebnis zu:

$$a(x, y) = m_a + A \cdot \cos\left(2\pi[f_x x + f_y y] - \varphi_a\right) \quad \text{mit}$$

$$m_a = m_e \cdot G_m, \quad A = E \cdot |G|, \quad \varphi_a = \varphi_e + \varphi \quad (22)$$

Der Ausgangsmittelwert  $m_a$  ist gleich Eingangsmittelwert multipliziert mit dem Mittelwertübertragungsfaktor  $G_m = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) dx dy$ . Die Amplitude  $A$  am Ausgang ist also das Produkt von Eingangsamplitude und Betrag der Übertragungsfunktion. Die Ausgangsphase  $\varphi_a$  ist eine Phasenverschiebung nach der Übertragung am Ausgang. Nach Normierung über den Mittelwert erhält man die Gleichung:

$$a(x, y) = 1 + k_a \cdot \cos\left[2\pi(f_x x + f_y y) - \varphi_a\right] \quad \text{mit}$$

$$k_a = |G(f_x, f_y)| \cdot k_e \quad (23)$$

Die Übertragung einer sinusförmigen Schwingung am Eingang ergibt wieder eine Sinusschwingung am Ausgang. Die 2D-Sinusschwingung am Ausgang unterscheidet von der am Eingang in Kontrast und Phase.

$G(f_x, f_y)$  ist die komplexe ortsfrequenzabhängige Übertragungsfunktion. Sie wird synonym auch als OTF (optical transfer function) bezeichnet. Diese beschreibt ein lineares, stationäres und separierbares Bildübertragungssystem vollständig im Ortsfrequenzbereich. Mathematisch gilt der Zusammenhang:

$$G(f_x, f_y) = |G(f_x, f_y)| e^{j\varphi(f_x, f_y)} \quad (24)$$

Der Betrag der optischen Übertragungsfunktion ist die Modulationsübertragungsfunktion. Im deutschen ist die Abkürzung MÜF gebräuchlich, sonst MTF (modulation transfer function) [1]. In dieser Diplomarbeit wird die Abkürzung M für Modulationsübertragungsfunktion benutzt. Im Ortsfrequenzbereich wird der Eingangskontrast einfach mit der M multipliziert. Im Ortsbereich muss das Faltungsintegral gelöst werden. Im Ortsfrequenzbereich wird daraus eine einfache punktweise Multiplikation. Falls die Gewichtsfunktion experimentell er-



mittelt werden kann, lässt sich die optische Übertragungsfunktion durch Fouriertransformation berechnen.

Wenn alle Sinusschwingungen am Ausgang  $A(f_x, f_y)$  überlagert werden, erhält man das Ausgangssignal als ortsabhängige Größe.

$$a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(f_x, f_y) \cdot e^{+i2\pi(f_x \cdot x + f_y \cdot y)} df_x df_y \quad (25)$$

## 2.5 Kennfunktionen

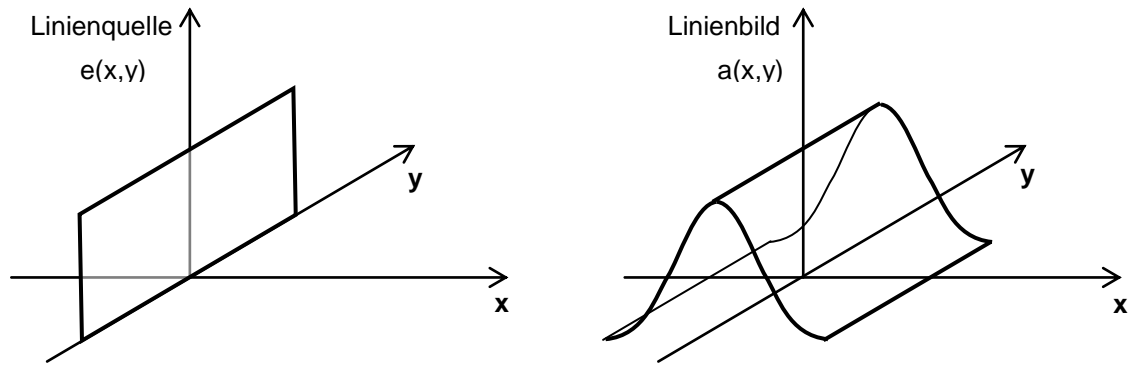
### 2.5.1 Punktbild, Linien- und Kantenbild

Das Punktbild entspricht der 2D-Gewichtsfunktion. Ein zweidimensionaler Diracimpuls wird als Eingangssignal genutzt. Der Ausgang liefert ein glockenförmiges Punktbild (PSF, Abbildung 7). Sie beschreibt das örtliche Übertragungsverhalten vollständig.

Aber auch der eindimensionale Diracimpuls kann als Testsignal benutzt werden. Am Eingang wird der eindimensionale Diracimpuls als Linie dargestellt. Die Linienquelle ist eine Objektverteilung, die nur in einer Richtung eine Deltafunktion (Diracimpuls) ist. In der dazu senkrechten Richtung ist die Objektverteilung ortsunabhängig [1]. Die mathematische Beschreibung der Linienquelle ist:

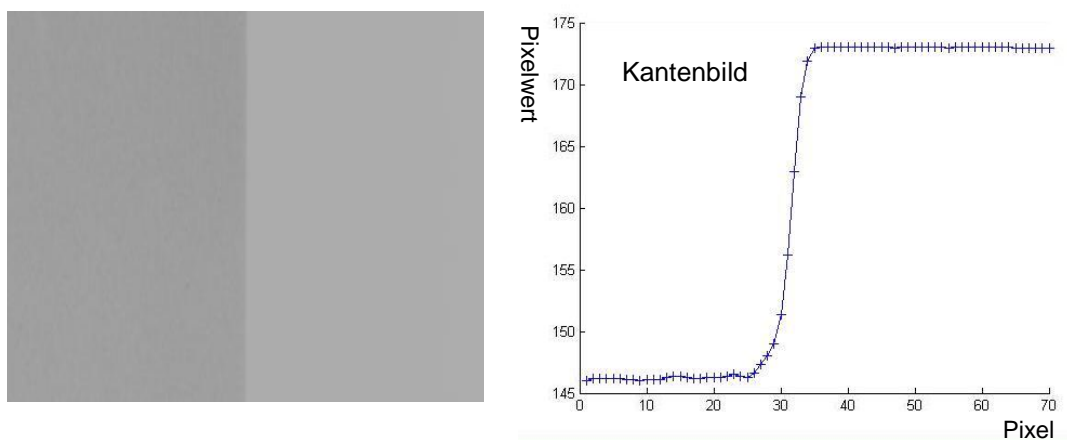
$$\delta(x) = 0 \quad \forall x \neq 0, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1 \quad \text{für alle } y \quad (26)$$

Am Ausgang liefert die Linienquelle ein Linienbild (LSF, line spread function). Die LSF ist die eindimensionale Gewichtsfunktion.



**Abbildung 11: Linienquelle in der Objektebene (links); Linienbild in Bildebene (rechts)**

Eine scharfe Kante kann als Testeingang verwendet werden. In der Bildebene wird ein Dunkel-Hell-Übergang erzeugt. Dieser wird als Kantenbild bzw. als Übergangsfunktion bezeichnet und ist die Systemantwort auf den Einheitssprung. Abbildung 12 zeigt das Kantenbild (Röntgenaufnahme einer Bleikante) und den dazugehörige Pixelwertverlauf.



**Abbildung 12: Röntgenaufnahme(links) einer Kante und Pixelverlauf (rechts)**

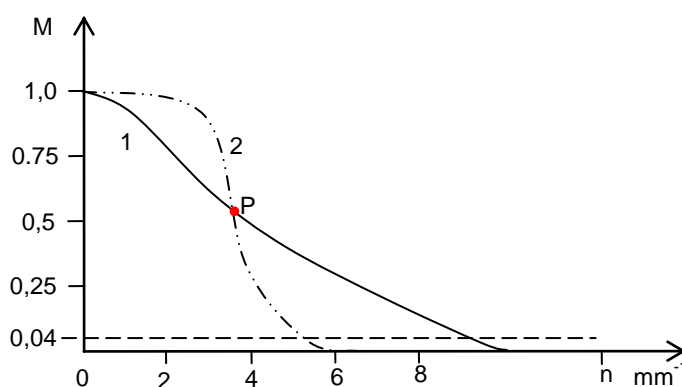
## 2.5.2 Modulationsübertragungsfunktion

Die Modulationsübertragungsfunktion  $M$  ist der Betrag der Optischen Übertragungsfunktion. Sie hat nach Normierung den Wert Eins bei der Ortsfrequenz Null [1]. Sie charakterisiert das Auflösungsvermögen für ortsinvariante Abbildungssysteme. Diese Funktion gibt an, wie stark der Kontrast eines si-

nusförmigen Eingangssignals bei einer bestimmenden Frequenz durch Übertragungssystem wiedergegeben wird.

$$M = \frac{\text{Kontrast}_{\text{Ausgang}}(f_x, f_y)}{\text{Kontrast}_{\text{Eingang}}(f_x, f_y)} \quad (27)$$

Für ein bildgebendes System mit ortsabhängigen Signalen handelt es sich bei der Frequenz um eine Ortsfrequenz. Ihre Einheit ist  $\text{mm}^{-1}$ . Typische Verläufe der Modulationsübertragungsfunktion sind in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13: Beispiele für Modulationsübertragungsfunktionen**

Bei einer idealen Übertragung hat die Modulationsübertragungsfunktion den Wert 1 für alle Ortsfrequenzen. Der Wert 0,04 ist die Grenze, bei der menschliche Augen Kontraste gerade noch wahrnehmen können. Je höher die M-Kurve bleibt umso besser wird das Eingangssignal übertragen. Je mehr die M-Kurve nach rechts rutscht, umso höhere Ortsfrequenzen des Eingangssignals werden übertragen. In der Abbildung vor dem Schnittpunkt P ist die Auflösung der Kurve 2 besser als die der Kurve 1. Nach dem Schnittpunkt P ist es umgekehrt, da ab hier die Kurve 1 einen größeren Modulationsübertragungsfaktor als die Kurve 2 hat.

Für ein ganzes System müssen die Modulationsübertragungsfunktionen  $M_n$  für jede einzelne Komponente  $n$  bestimmt werden. Im Ortsfrequenzbereich ist die gesamte Modulationsübertragungsfunktion das Produkt der  $M_n$  aller Einzel-

komponenten [4, 15].

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot \dots \cdot M_n = \prod_n M_n \quad (28)$$

### 2.5.3 Zusammenhänge

Die Fouriertransformierte der Gewichtsfunktion  $g(x,y)$  (PSF) als Systemantwort auf den 2D-Diracimpuls ist die optische Übertragungsfunktion OTF (2.4.5). Der absolute Betrag der OTF ist die Modulationsübertragungsfunktion M. Die Gewichtsfunktion ist die Fourierrücktransformierte der optischen Übertragungsfunktion.

Der Zusammenhang zwischen M und PSF wird mathematisch wie folgt beschrieben:

$$M(f_x, f_y) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x, y) \cdot e^{+i2\pi(f_x \cdot x + f_y \cdot y)} dx dy \right| \quad (29)$$

Die Linienbildfunktion (LSF) ist einfach aus der PSF abzuleiten. In diesem Fall gilt für den mathematischen Zusammenhang zwischen M und LSF:

$$M(f_x) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} LSF(x) e^{+i2\pi f_x x} dx \right| \quad (30)$$

Das Kantenbild wird am meisten als Testsignal angewandt, da es technisch einfach zu erzeugen ist. Die Kantenbildfunktion wird auch als edge spread function (ESF) bezeichnet. Die LSF wird durch Differentiation aus der ESF berechnet [4,7,15].

$$LSF(x) = \frac{d(ESF(x))}{dx} \quad (31)$$

Es gibt zwei Möglichkeiten die Modulationsübertragungsfunktion M zu ermitteln.

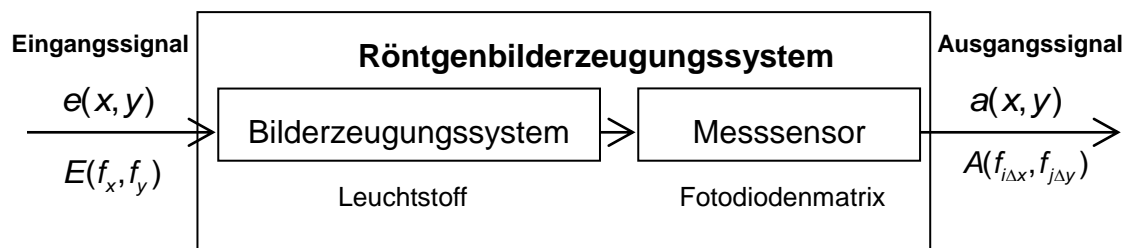
1. Messung der M im Ortsbereich als ein- oder zweidimensionale Gewichtsfunktion. Dann wird die 1D- oder 2D-Gewichtsfunktion fouriertransformiert.

2. Messung der M als optische Übertragungsfunktion in Ortsfrequenzbereich.  
Jede Messungsmethode verwandt eigene Messphantome. Diese werden im Kapitel 4 vorgestellt.

## 2.6 Übertragungskette und Ansatz

Ein Bilderzeugungssystem kann mehrere Wandlerstufen besitzen. Jede Wandlerstufe hat eine eigene Übertragungsfunktion. Diese übertragen das Bild nacheinander. Bei den indirekten Bildwandlern werden die Röntgenquanten aufgrund von Fluoreszenz oder Phosphoreszenz zuerst in sichtbares Licht gewandelt. Dann werden die Lichtquanten mit einer großen Matrix von Fotodioden oder einem Sekundärelektronenvervielfacher detektiert und in ein elektrisches Signal gewandelt.

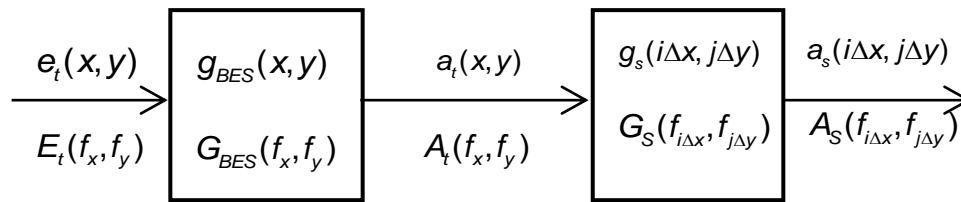
Die Signalübertragung des indirekten digitalen Röntgenbilderzeugungssystems besteht immer aus zwei Komponenten [2].



**Abbildung 14: Messaufbau digitaler Röntgenbilderzeugungssysteme**

Die erste Komponente ist ein analoger Bildwandler. Die Leuchtstoffe in Speicherfolien oder Flachbilddetektoren sind amorph und zeigen keine reguläre Matrixstruktur. Die zweite Komponente misst das sichtbare Licht. Hier erfolgt die Diskretisierung in den Ortskoordinaten und nach der A/D-Wandlung die Diskretisierung der Signalwerte. Und dieser zweite Wandlungsschritt ist der Zugang zur Messung des Übertragungsverhaltens der ersten Bildwandlung. Der zweite Schritt der Bildwandlung ist der Messsensor. Auch er hat ein eige-

nes Übertragungsverhalten. Die gesamte Übertragungskette wird in folgender Weise ausgedrückt.



**Abbildung 15: Übertragungskette**

Dabei ist  $g_{BES}(x,y)$  die Gewichtsfunktion und beschreibt das Übertragungsverhalten des Bilderzeugungssystems im Ortsbereich und  $G_{BES}(f_x, f_y)$  ist die komplexe Übertragungsfunktion und beschreibt das Übertragungsverhalten im Ortsfrequenzbereich,  $g_s(i\Delta x, i\Delta y)$  ist die Gewichtsfunktion und  $G_S(f_{i\Delta x}, f_{j\Delta y})$  die Übertragungsfunktion vom Messsensor. Ein Testeingangssignal  $e_t(x,y)$  bzw. sein Ortsfrequenzspektrum  $E_t(f_x, f_y)$  liegen am Eingang des Bildwandlers. Nach der ersten analogen Übertragung ist die Zwischenantwort auf das Testeingangssignal der Ausgang  $a_t(x,y)$  und sein Ortsfrequenzspektrum  $A_t(f_x, f_y)$ . Nach der zweiten Wandlung liegen am Ausgang  $a_s(i\Delta x, i\Delta y)$  bzw. das Ausgangsortsfrequenzspektrum  $A_s(f_{i\Delta x}, f_{j\Delta y})$ .

Die ganze Übertragungskette in Ortsfrequenzbereich lautet:

$$A_S(f_{i\Delta x}, f_{j\Delta y}) = E_t(f_x, f_y) \cdot G_{BES}(f_x, f_y) \cdot G_S(f_{i\Delta x}, f_{j\Delta y}) \quad (32)$$

Das Übertragungsverhalten des Bilderzeugungssystems  $G_{BES}(f_x, f_y)$  ergibt sich wie folgt:

$$G_{BES}(f_x, f_y) = \frac{A_S(f_{i\Delta x}, f_{j\Delta y})}{E_t(f_x, f_y) \cdot G_S(f_{i\Delta x}, f_{j\Delta y})} \quad (33)$$

Die Übertragungsfunktion  $G_{BES}(f_x, f_y)$  wird durch den Ausgang  $A_s(f_{i\Delta x}, f_{j\Delta y})$  einfach beschrieben, wenn das Produkt der Nenner gleich Eins ist  $E_t(f_x, f_y) \cdot G_S(f_{i\Delta x}, f_{j\Delta y}) = 1$ . Das Testortsfrequenzspektrum ist gleiche Eins für alle Ortsfrequenzen, wenn ein Diracimpuls an den Eingang gelegt wird. Für den

Sensor ist  $G_s(f_{i \cdot \Delta x}, f_{j \cdot \Delta y}) = 1$  für alle Ortsfrequenzen nicht möglich. Es reicht aber praktisch aus, wenn  $G_s(f_{i \cdot \Delta x}, f_{j \cdot \Delta y}) = 1$  nur im relevanten Ortsfrequenzbereich gilt, also etwa das 10-fache der höchsten übertragbaren Ortsfrequenz erreicht.

### 3 Präzisierte Aufgabenstellung

Zur Analyse des Übertragungsverhaltens indirekter, digitaler Röntgenbildwandler mit Leuchtstoffen sind folgende methodische und experimentelle Teilaufgaben zu lösen:

- Auswahl geeigneter Eingangstestsignale und realisierbarer Testobjekte,
- Analyse der mathematischen Zusammenhänge zwischen den gewählten Kennfunktionen zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens im Orts- und Ortsfrequenzbereich,
- Vorschlag von geeigneten einfachen Modellfunktionen zur analytischen Beschreibung der experimentell ermittelten Kennfunktionen,
- Experimentelle Ermittlung des Übertragungsverhaltens:
  - globale Übertragungseigenschaften (Homogenität, Invarianzen),
  - statische Kennlinien,
  - örtliche Dynamik mit Kennfunktionen im Orts- und Ortsfrequenzbereich,
  - Interpretation und Vergleich der Ergebnisse,
- physikalische Deutung der Modellfunktionen,
- Zusammenstellung weiterführender Aufgaben.



## **4 Eingangstestsignale, Testobjekte**

### **4.1 Aperiodische Eingangstestsignale**

#### **4.1.1 Lochblende, Linienblende**

Es sollen Phantome genutzt werden, welche geeigneten Eingangstestsignale erzeugen können, welche als Systemantwort möglichst die gesuchte Kennfunktion des Übertragungsverhaltens liefern. Methodisch am einfachsten ist dies mit dem Diracimpuls am Eingang zu erreichen. Nur ein einziger Punkt, eine einzige Linie oder Kante wird durch das Phantom erzeugt. Solche Testsignale sind aperiodische Eingangstestsignale.

Ein 2D-Diracimpuls wird durch eine Lochblende erzeugt. Der Durchmesser des muss 10fach kleiner als die Breite des zu vermessenden Punktbilds. Bei 100µm wäre das z.B. 10µm. Das ist technisch schwer zu fertigen und bei einem so kleinen Eingangssignal ist es auch schwer ein hinreichend großes Ausgangssignal zu erhalten. Aus diesem Grund wurde kein 2D-Diracimpuls als Testsignal verwendet.

Eine Linienblende zeigt das gleiche Problem wie Lochblenden. Sie ist auch nicht geeignet für die experimentelle Untersuchung des Übertragungsverhaltens. Eine alternative Möglichkeit ist die Benutzung der Kante.

#### **4.1.2 Kante**

Um ein Kantenbild zu erzeugen wird eine Bleifolie in Acryglasplatten eingebettet. Eine Hälfte des Phantoms ist von Blei bedeckt, die andere nicht. Somit wird eine Kante erzeugt als sprungförmige Schwächungsänderung zwischen Blei und der Luft. Die Kante muss „scharf“ sein, also exakt rechtwinklig über

die Bleidicke und glatt geschnitten. Wegen der mechanischen Herstellung ist die Kante aber nicht glatt. Sie besitzt immer eine Unebenheit. Das Breite der Unebenheit sollte viel kleiner als die Pixelgröße sein, damit kein großer Einfluss auf die Messungen entsteht. Ein Mikroskopbild des Phantoms zeigt die Abbildung 16.

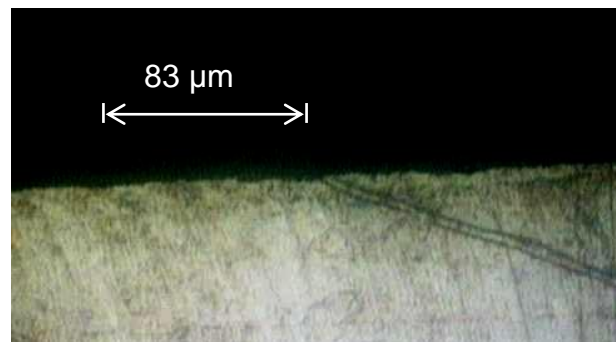


Abbildung 16: Kantenphantom ( $d=0.08\text{mm}$ ) unter Mikroskop (50fach vergrößert) [13]

## 4.2 Periodische Eingangstestsignale

Um eine zweite Messmöglichkeit zu realisieren, werden periodische ortsabhängige Eingangstestsignale mit definierten Parametern benutzt. Die Sinuswelle ist ein ideales Testsignal, um die OTF zu ermitteln. Aber es ist schwierig, am Eingang eines Röntgenbilderzeugungssystems eine örtlich sinusförmige Dosisverteilung zu erzeugen. Das Testsignal entsteht im Phantom durch die Wechselwirkung der Röntgenstrahlen mit Materialien unterschiedlicher Schwächungseigenschaften. Es ist technisch nicht realisierbar eine Bleischicht so zu formen, dass die Dosis längs der Ortskoordinaten sinusförmig moduliert wird. Alternativ werden Rechteckraster aus Bleifolien verwendet, die mit beherrschbarem Aufwand und hinreichend reproduzierbar hergestellt werden können.

## 4.3 Bleistrichraster

### 4.3.1 Aufbau, Arten

Unter andern die Firma Funk Erlangen bietet verschiedene Bleistrichraster an. Es gibt zwei Hauptarten. Bei der einen Gruppe ändern sich die Rastermaße stetig. Der Sternraster und der Besenraster gehören dazu. Der Sternraster sieht wie eine Kreisscheibe aus. Auf der Bleikreisscheibe wird von außen nach innen mit gleichem Öffnungswinkel geschnitten. Zwischen zwei Bleistegen befindet sich ein Abstand mit dem gleichen Öffnungswinkel. Ein „Bleistrich“ und ein „Luftstrich“ bilden eine Periode (Abbildung 17). Es gibt keine Skala für die Ortsfrequenz auf dem Sternraster. Er ist nicht geeignet für eine quantitative MÜF-Bestimmung. Zusätzliche Probleme ergeben sich aus der Kreisgeometrie des Sternrasters und der rechteckigen Pixelmatrix des Röntgenbildwandlers. Der Sternraster wird meist für Brennfleckbestimmungen von Röntgenröhren verwendet [5].

Der Besenraster ist ein Segment vom Sternraster. Auf den Rastern ist die Ortsfrequenz angegeben. Er ist gut geeignet zur visuellen Bewertung der örtlichen Auflösung. Besenraster sind eher einsetzbar zur objektiven Bestimmung des Übertragungsverhaltens. Die Abbildung 17 zeigt ein Bild von einem Sternraster und einem Besenraster als Beispiel. Die genaue Information ist in der Anlagen zu finden.

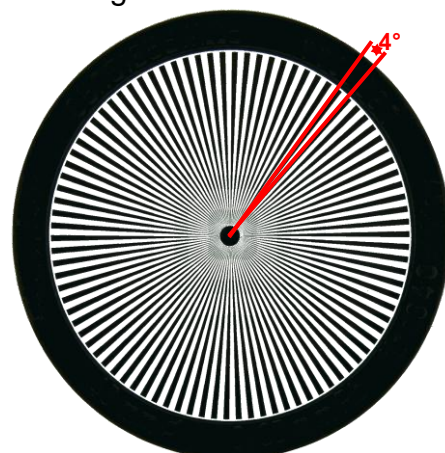
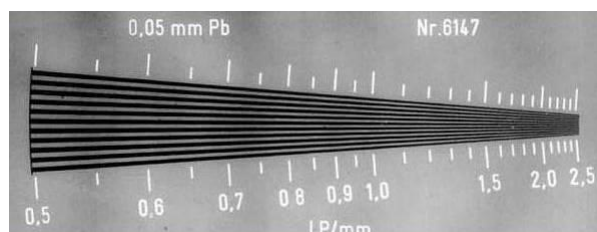
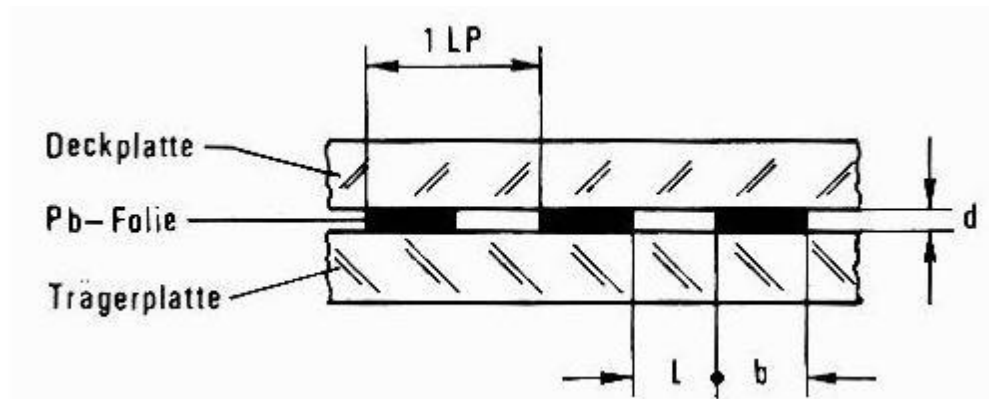


Abbildung 17: Besentest rechts [aus 5], Sternraster links (Lichtaufnahme)

Bei der zweiten Gruppe der Bleistrichraster ändern sich die Rastermaße nicht stetig. Sie bestehen aus parallelen Bleistreifen zwischen zwei durchsichtigen Acylglasplatten. Der Zwischenraum (Lücke  $l$ ) hat die gleiche Breite wie der benachbarte Bleistreifen (Balken  $b$ ). Ein Balken und eine Lücke mit der gleichen Breite werden zusammen als ein Linienpaar LP bezeichnet. Die Abbildung 18 skizziert den Aufbau der Rechteckraster.



**Abbildung 18: Aufbau der Rechteckraster [aus 5]**

Die Ortsfrequenz ( $f$ ) in  $\text{mm}^{-1}$  war nur für sinusförmige Signale definiert. Ein Linienpaar des Bleistrichrasters ist aber ein rechteckförmiges Signal. Eine bestimmte Breite  $B$  eines Linienpaares stellt im Ortsfrequenzbereich aber ein komplettes Ortsfrequenzspektrum wegen der enthaltenen Oberwellen dar. Deshalb wird die Ortssequenz für rechteckförmige Signale definiert. Ihre Einheit wird in Linienpaaren pro Millimeter ( $\text{Lp/mm}$ ) angegeben.

Um die Modulationsübertragungsfunktion zu messen, bietet die Firma Funk verschiedene Rechteckraster an. Für die Linientestraster werden einzelne Linienpaare mit jeweils abnehmender Linienpaarbreite zusammengestellt.

Für Gruppentestraster werden mehrere Linienpaare mit gleicher Breite gruppiert. Und dann werden die Gruppen mit abnehmender Breite zusammengestellt. Zusätzlich können jeweils gleiche Gruppen in unterschiedlichen Winkeln angeordnet werden. Bei den meisten Rechteckrastern wird die Ortssequenz

gekennzeichnet oder in einem Datenblatt angegeben.

Die Umrechnung zwischen den Rechtecken und dem Sinus ist mit der Korrekturformel nach Altar realisierbar. Der Rechteckeraster ist geeignet für die objektive Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion. Abbildung 19 zeigt jeweils ein Linienraster und ein Gruppentestraster in zwei Richtungen. Beide sind von einer Digitalkamera mit sichtbarem Licht aufgenommen. Alle vorhandenen Rechteckraster sind in den Anlagen zusammengestellt.

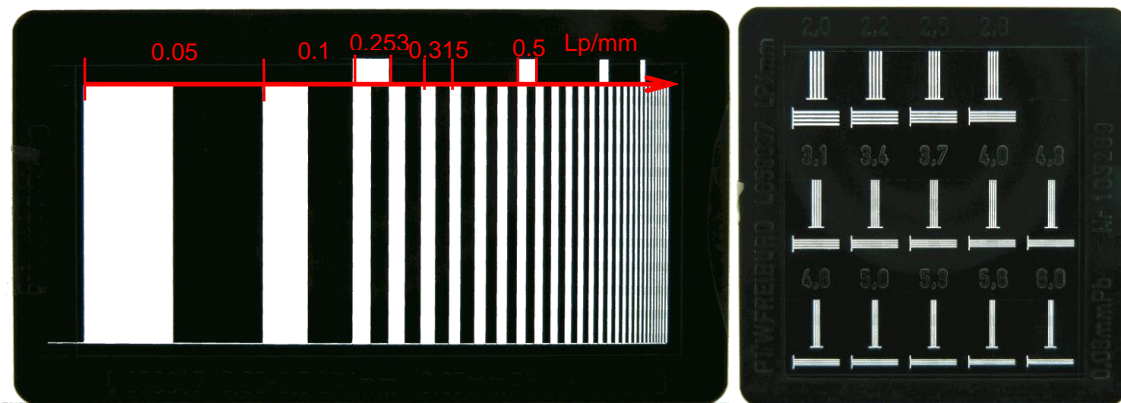


Abbildung 19: Linientestraster links Gruppentestraster mit zwei Richtungen rechts

### 4.3.2 2D-Rechteckschwingung

Analog zur 2D-Sinusschwingung soll eine Rechteckschwingung mit ihren Kenngrößen definiert werden. Daraus lassen sich die einzelnen Testsignale als ortsabhängige Signale und nach Fouriertransformation als Ortsfrequenzspektrum am Eingang ableiten. Nach dem Ansatz zur Messung des Übertragungsverhaltens kann dann aus dem gemessenen Ausgangssignal  $M$  bzw. die OTF abgeleitet werden.

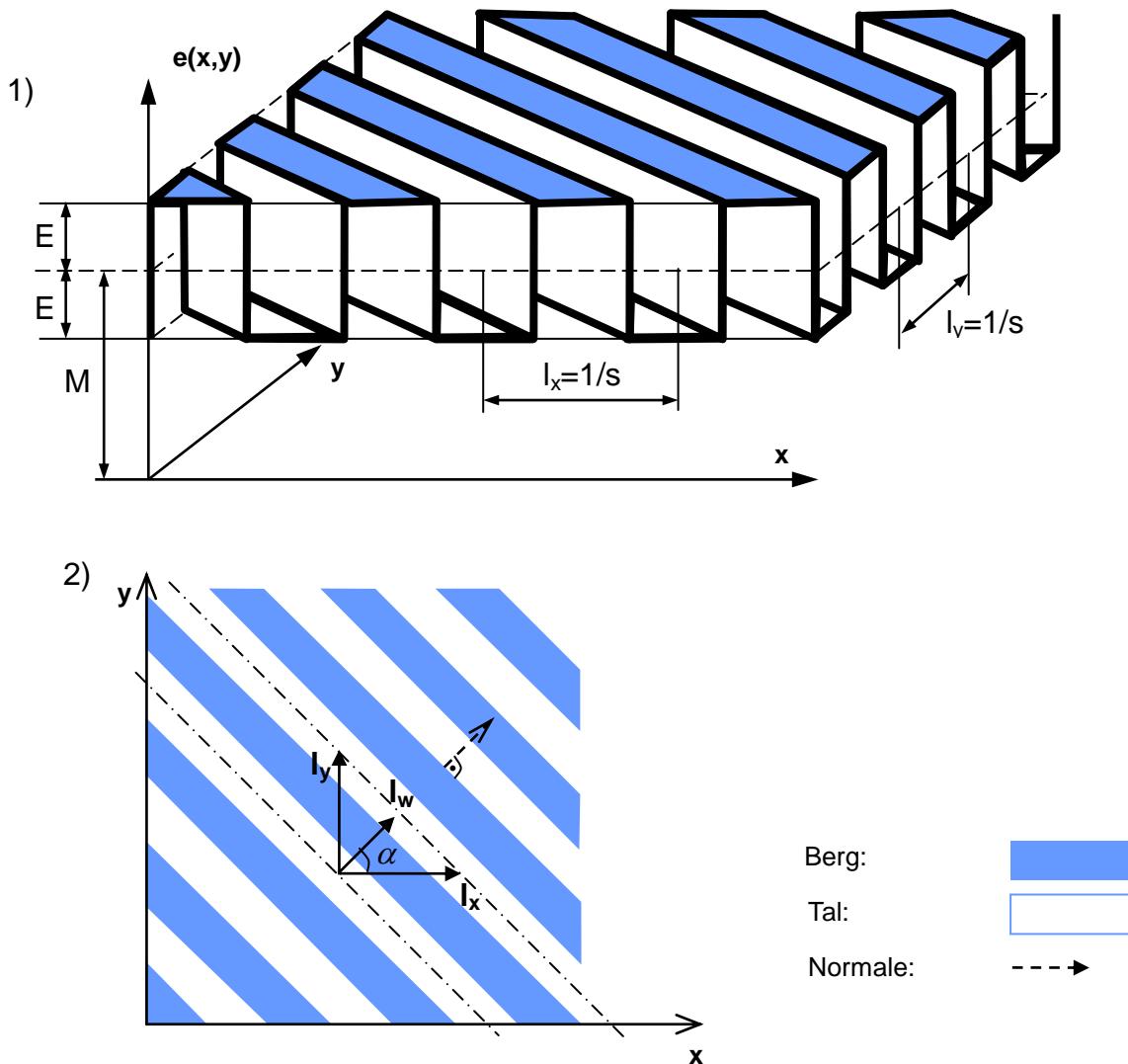


Abbildung 20: 2D-Rechteckschwingung : 1) Seitenansicht, 2) Draufsicht

Dabei ist  $l_w$  die Periodenlänge entlang die Richtung der Wellennormalen. Nach Zerlegung der Periodenlänge in x und y-Richtung ergibt sich daraus:

$$l_x = \cos(\alpha) \cdot l_w \quad \text{und} \quad l_y = \sin(\alpha) \cdot l_w \quad (34)$$

Der Kehrwert der Periodenlänge  $1/l_w$  ist die Sequenz  $s_w$ . Die Einheit ist LP/mm (Linienpaare pro Millimeter). Dies muss sorgfältig von der bereits eingeführten Ortsfrequenz differenziert werden. In der Literatur wird oft auch die Ortsfrequenz in Lp/mm angegeben. Nur bei nicht umgerechneten Messergebnissen von Linienrastern ist es sinnvoll, die Einheit der Ortssequenz zu nutzen. Auch hier ergeben sich zwei Ortssequenzanteile in der X- und Y-Richtung:

$$s_x = \cos(\alpha) \cdot s_w \quad \text{und} \quad s_y = \sin(\alpha) \cdot s_w \quad (35)$$

Unter Nutzung der Winkelbeziehung:

$$\cos(\alpha) = \frac{l_w}{l_x} = \frac{s_x}{s_w} \quad \text{und} \quad \sin(\alpha) = \frac{l_w}{l_y} = \frac{s_y}{s_w} \quad (36)$$

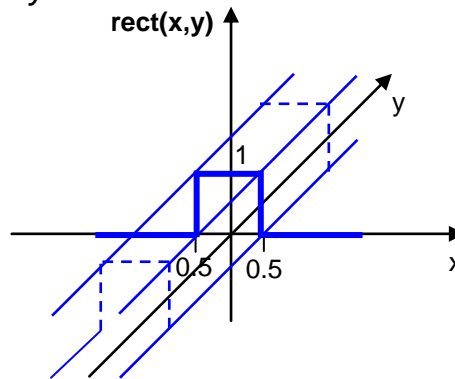
So ergibt sich die Zusammenhang zwischen den Ortssequenzanteilen:

$$s_w = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad \text{und} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{s_y}{s_x}\right) \quad (37)$$

Mit  $\alpha = 0^\circ$  läuft die Rechteckwelle längs der x-Achse mit  $s_y = 0$  und  $s_w = s_x$ . Mit  $\alpha = 90^\circ$  läuft die Rechteckwelle längs der y-Achse mit  $s_x = 0$  und  $s_w = s_y$ . Die Rechteckwelle mit  $\alpha = 0^\circ$  wird mathematisch so formuliert:

$$y(x, y) = \text{rect}(x, y) = \begin{cases} 1, & \forall |x| \leq 0.5 ; \forall y \\ 0, & \forall |x| > 0.5 ; \forall y \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} y(x, y) dx = 1 ; \forall y \quad (38)$$



**Abbildung 21: Die Rechteckwelle mit  $\alpha = 0^\circ$**

Entlang der y-Richtung ist die Rechteckwelle für alle y immer identisch. Deswegen können wir die Rechteckwelle vereinfacht und nur in x-Richtung bei  $y = 0$  betrachten. Daraus ergibt sich eine eindimensionale normierte Rechteckfunktion.

$$y(x) = \text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 0.5 \\ 0, & |x| > 0.5 \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{\infty} y(x) dx = 1 \quad (39)$$

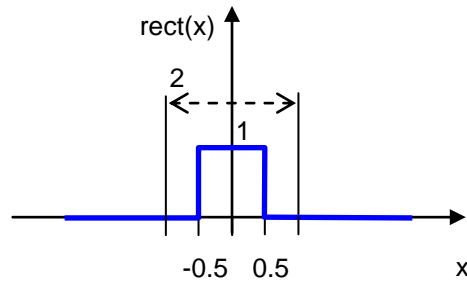


Abbildung 22: Die normierte Rechteckfunktion

Die normierte Rechteckfunktion ist ein aperiodisches Ortssignal. Durch Fouriertransformation erhält es ein kontinuierliches Spektrum im Ortsfrequenzbereich [6].

$$y(x) = \text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & \forall |x| \leq 0.5 \\ 0, & \forall |x| > 0.5 \end{cases} \quad \circ - \bullet \quad Y(f_x) = \frac{\sin(\pi f_x)}{\pi f_x} = \text{sinc}(\pi f_x) \quad (40)$$

Bei  $f_x = 2nf_{x0}$  wird das Spektrum jeweils Null. Das Spektrum  $Y(f_x)$  besitzt nur reelle Anteile. Der imaginäre Anteil des Spektrum  $Y(f_x)$  ist null. Die Phasen  $\varphi(f_x)$  wechseln nur zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  [8].

$$\varphi(f_x) = \begin{cases} 0^\circ, & \forall \text{sinc}(\pi f_x) \geq 0 \\ 180^\circ, & \forall \text{sinc}(\pi f_x) < 0 \end{cases} \quad (41)$$

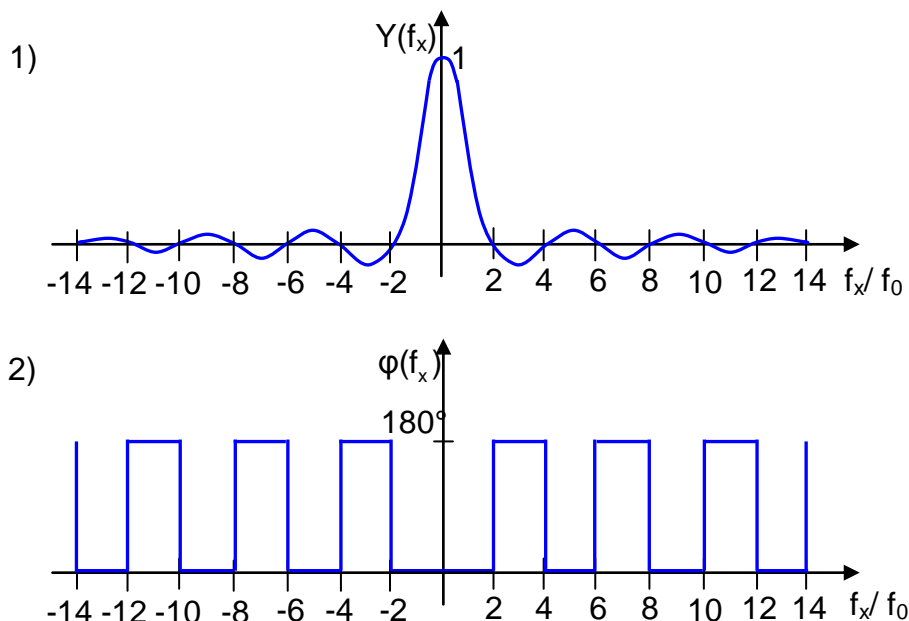


Abbildung 23: 1) Ortsfrequenzspektrum der normierten Rechteckfunktion  
2) zugehöriges Phasenspektrum



Die Grenze bei  $x=\pm 0.5$  ist so festgelegt, dass das Rechteck  $\text{rect}(x)$  die Höhe, Breite und Fläche Eins hat. Um einen Rechteckimpuls mit beliebiger Amplitude  $A$  und beliebiger Breite  $l_x$  zu erhalten muss die Rechteckfunktion entnormiert werden. Analog zu der Gleichung 40 lautet der entnormierte Rechteckimpuls  $y(x)$  und seine Fouriertransformierte  $Y(f_x)$ :

$$y(x) = A \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}\right) = \begin{cases} A, & \forall |x| \leq 0.5 l_x \\ 0, & \forall |x| > 0.5 l_x \end{cases} \quad \bullet \quad Y(l_x) = \frac{\text{sinc}(\pi f_x l_x)}{\pi f_x l_x} = \text{sinc}(\pi f_x l_x) \quad (42)$$

Die Grundfrequenz  $f_{x0}$  ist  $1/(2l_x)$ . Bei  $f_x=2nf_{x0}$  wird das Spektrum jeweils Null.

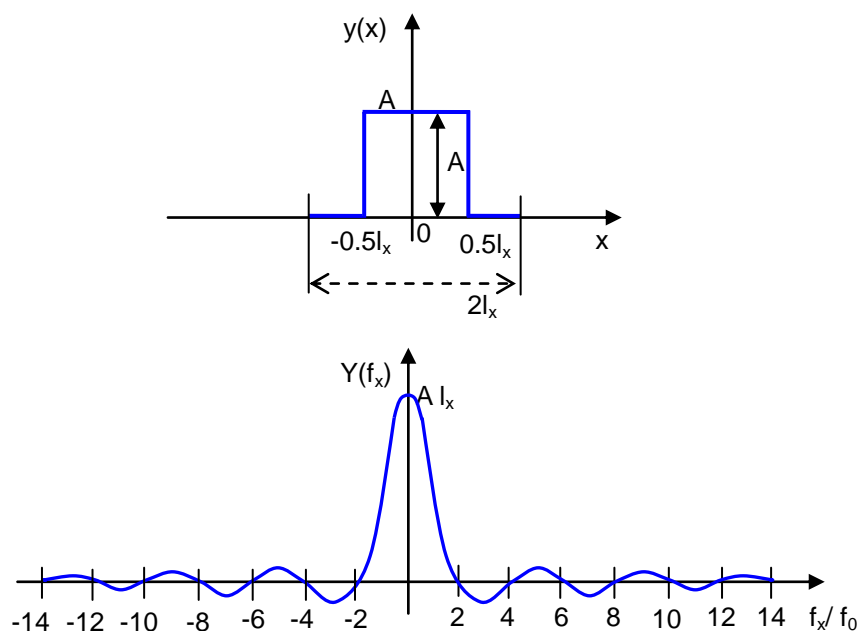


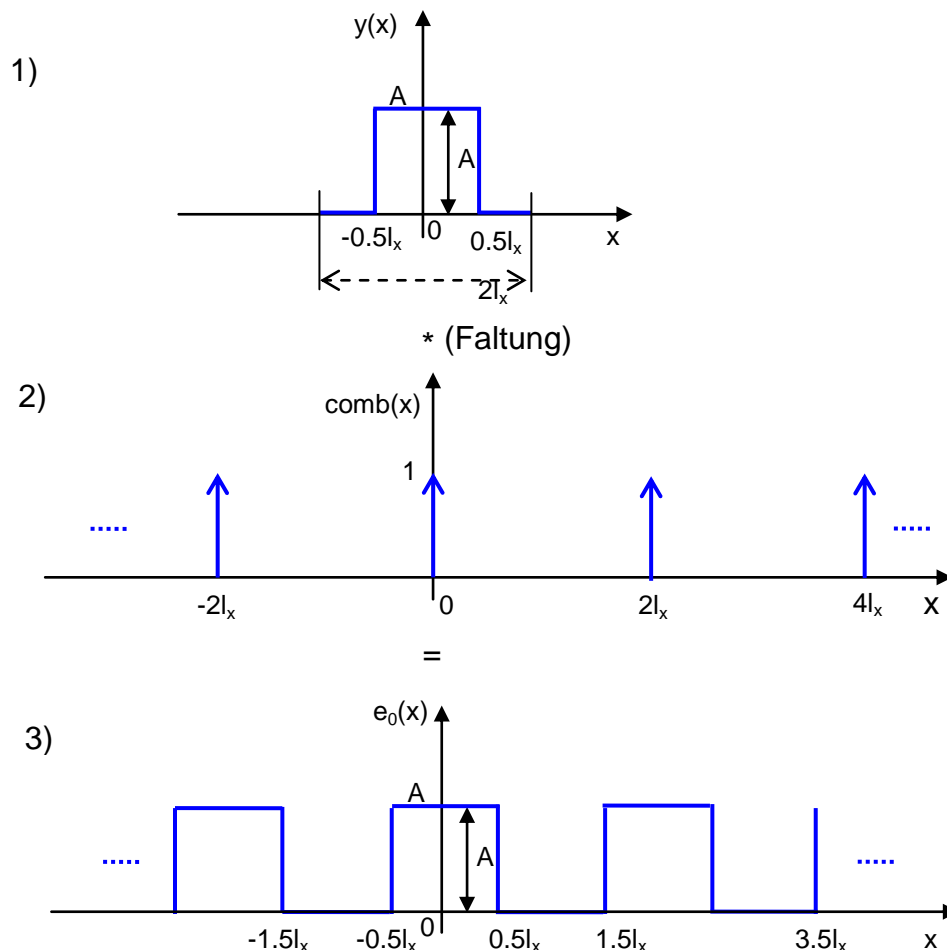
Abbildung 24: Rechteckimpuls und sein Ortsfrequenzspektrum

### 4.3.3 Ideale Bleistrichraster

Ein idealer Linientestraster  $e_0(x)$  wird als die Periodifizierung  $P$  des Rechteckimpuls  $y(x)$  gesehen. Die Periodenlänge ist  $2l_x$ . Die Grundfrequenz ( $f_{x0}$ ) ist gleich  $1/(2l_x)$ .

$$e_0(x) = P_{2l_x} \left\{ y(x) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}\right) \right\} \quad (43)$$

Der periodische Vorgang kann mathematisch durch Faltung beschrieben werden [6]. Eine normale unendliche Rechteckfolge  $e_0(x)$  wird als die Faltung zwischen einem Rechteckimpuls  $y(x)$  und einem unendlichen Diracimpulskamm  $\text{comb}(x)$  betrachtet. Die Periodenlänge dem Diracimpulskamm ist  $2l_x$ .



**Abbildung 25: 1) Rechteckimpuls ; 2) Diracimpuls-Kamm; 3) Rechteckfolge**

Der in Abbildung 25 gezeigte Diracimpulskamm im Ortsbereich ist eine unendliche Folge von äquidistanten Diracimpulsen [6]. Der Diracimpulskamm wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n \cdot 2l_x), \quad n \in \mathbb{Z} \quad (44)$$

Der Abstand zweier benachbarter Diracimpulse ist  $2l_x$ . Die Grundfrequenz  $f_{x0}$  ist  $1/(2l_x)$ . Der Diracimpulskamm wird in eine Fourierreihe entwickelt. Es ergibt sich folgendes Ergebnis: Die Fourier-Transformierte eines Diracimpulskamms

im Ortsbereich ist im Ortsfrequenzbereich wieder ein Diracimpulskamm [6].  
Mathematisch wird  $\text{comb}(f_x)$  wie folgt beschrieben:

$$\text{comb}(f_x) = f_{x0} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f_x - n \cdot f_{x0}) , \quad f_{x0} = 1/(2l_x) \quad (45)$$

Aus den Gleichungen 42 und 44 wird die Rechteckfolge  $e_0(x)$  abgeleitet:

$$e_0(x) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}\right) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n \cdot 2l_x) \quad (46)$$

Eine Faltung im Ortsbereich entspricht einer Multiplikation im Ortsfrequenzbereich. Die Rechteckfolge  $e_0(x)$  ist ein unendliches periodisches Signal. Das Spektrum ist diskret. Aus den Gleichungen 42 und 45 folgt:

$$\begin{aligned} E_0(f_x) &= Y(f_x) \cdot \text{comb}(f_x) \\ &= A l_x \text{sinc}(\pi l_x f_x) \cdot f_{x0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f_x - n \cdot f_{x0}) \text{ mit } f_{x0} = 1/(2l_x) \\ &= \frac{A}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi l_x f_x) \cdot \delta(f_x - n \cdot f_{x0}) \end{aligned}$$

$$\text{Gleichanteile: } E_0(f_x = 0) = 1/2 l_x \cdot \int_{-0.5 l_x}^{0.5 l_x} A dx = \frac{A}{2} \quad (47)$$

Nehmen wir an  $A = 1$  und  $l_x = 0,5$ . Dann wird das Betragsspektrum  $|E_0(f_x)|$  folgendermaßen aussehen:

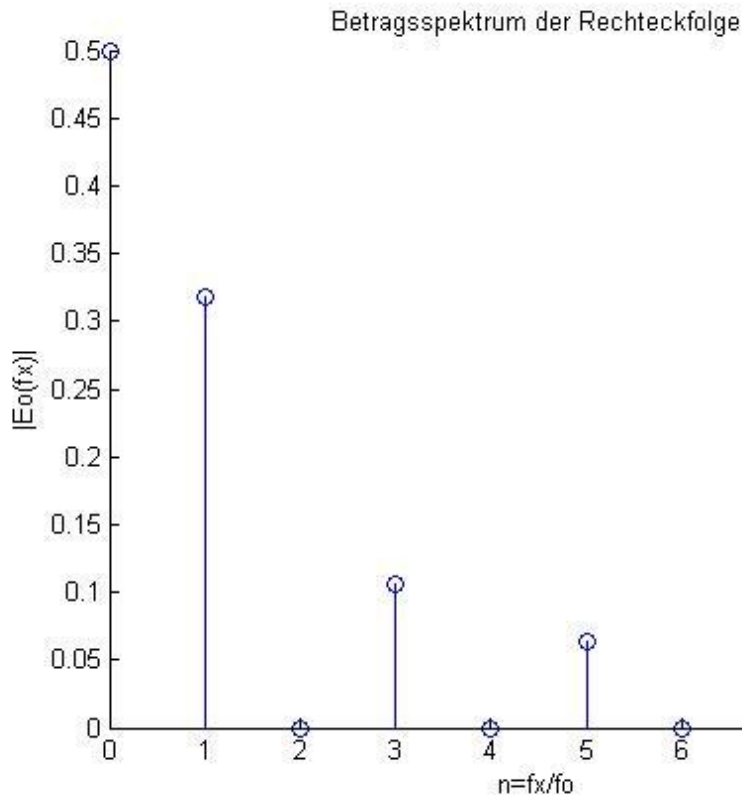


Abbildung 26: Betragsspektrum einer idealen Rechteckfolge

#### 4.3.4 Reale Bleistrichraster

Das Ortsfrequenzspektrum einer unendlichen Rechteckfolge ist ein Linienspektrum. Aber es ist praktisch nicht realisierbar. Die Testraster haben immer eine begrenzte Länge. Das Eingangssignal  $e(x)$  besitzt deshalb eine endliche Periodenlänge. Ein Rechteckimpuls  $y(x)$  mit der Breite  $L_0$  wird als Fensterfunktion benutzt, um unendliche Rechteckfolgen zu begrenzen. Die Breite  $L_0$  ist ein ganzzahliges Vielfaches der Periodenlänge der Rechteckfolge ( $L_0 = n2l_x$ ). Die Amplitude  $A$  der Fensterfunktion ist stets Eins.

Die Fensterfunktion  $y(x)$  und ihre Spektrum  $Y(f_x)$  werden analog zur Gleichung 39 angegeben:

$$y(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{L_0}\right) \circ - \bullet Y(f_x) = L_0 \text{sinc}(\pi f_x L_0) \quad (48)$$

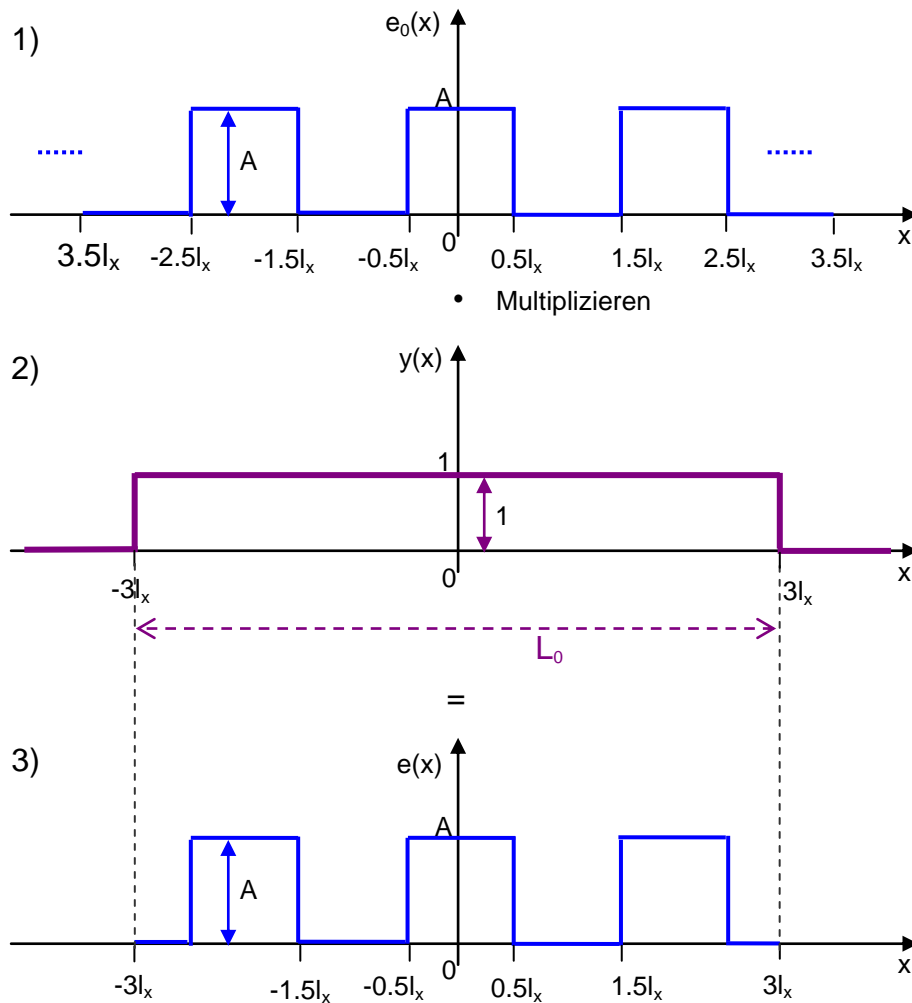


Abbildung 27: 1) ideale Rechteckfolge 2) Fensterfunktion 3) begrenzte Rechteckfolge

Im Ortsbereich entsteht das begrenzte Eingangssignal  $e(x)$  durch Multiplizieren zwischen der idealen Rechteckfolge  $e_0(x)$  und der Fensterfunktion  $y(x)$ . Im Ortsfrequenzbereich ist das Spektrum des Eingangssignals  $E(f_x)$  die Faltung der Ortsfrequenzspektrums von  $E_0(f_x)$  und  $Y(f_x)$  [6].

$$e(x) = e_0(x) \cdot y(x) \quad \circ - \bullet \quad E_0(f_x) * Y(f_x) = E(f_x)$$

$$\text{mit } E_0(f_x) * Y(f_x) = \int_{-\infty}^{\infty} E_0(f_x) \cdot Y(f_x^* - f_x) df_x \quad (49)$$

Aus der Gleichung 46 und 48 folgt für das begrenzte periodische Rechtecksignal  $e(x)$ :

$$e(x) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{L_0}\right) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2l_x n)$$

(50)

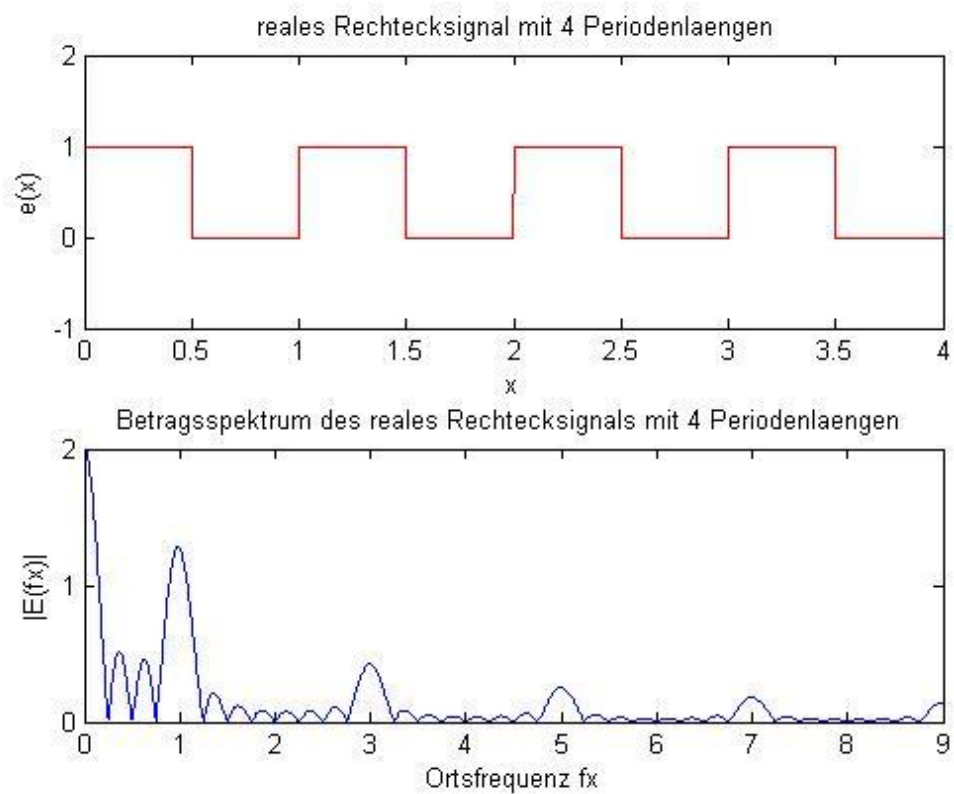
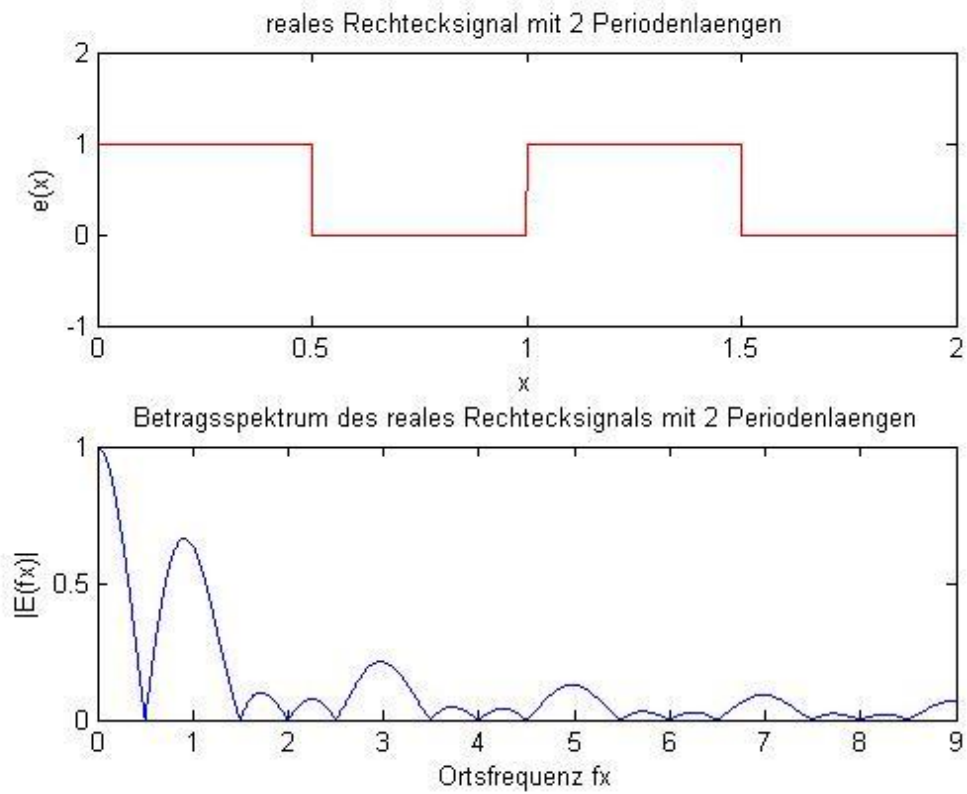
Ihr Spektrum wird wie folgt ausgedrückt:

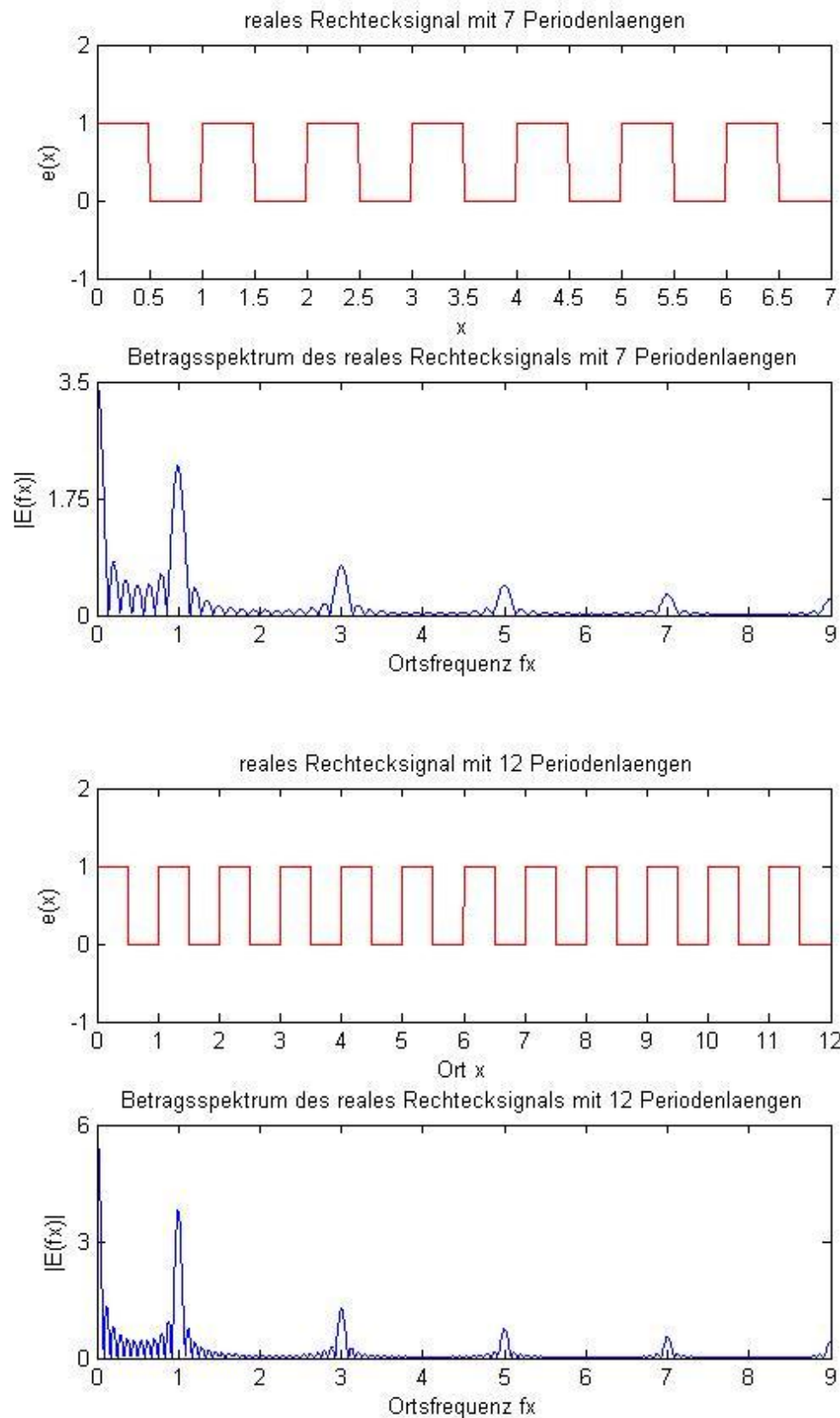
$$\begin{aligned} E(f_x) &= Y(f_x) * E_0(f_x) \\ &= \frac{A}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi l_x f_x) \cdot \delta(f_x - n \cdot f_{x0}) * L_0 \text{sinc}(\pi(f_x^* - f_x)L_0) \\ &= \frac{AL_0}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi l_x f_x) \cdot \delta(f_x - n \cdot f_{x0}) * \text{sinc}(\pi(f_x^* - f_x)L_0) \end{aligned}$$

Gleichanteil:  $E(f_x = 0) = \frac{A}{2} \cdot \delta(f_x) * L_0 \text{sinc}(\pi(f_x^* - f_x)L_0) = \frac{A \cdot L_0}{2}$

(51)

Die Grundfrequenz  $f_{x0}$  ist gleich  $1/(2l_x)$ . Die Gleichung 50 bedeutet, dass man die sinc-Funktion  $Y(f_x)$  mit dem diskreten Spektrum  $E_0(f_x)$  faltet. Das Spektrum  $E(f_x)$  kann so interpretiert werden, dass die sinc-Funktion der Fensterfunktion  $Y(f_x)$  über das diskrete Spektrum  $E_0(f_x)$  der unendlichen periodischen Rechteckfolge geschoben und mit dem Linienspektrum  $E_0(f_x)$  multipliziert wird. Als Ergebnis wird erwartet, dass das Linienspektrum  $E_0(f_x)$  mit der sinc-Funktion der Fensterfunktion  $Y(f_x)$  verschmiert wird. In den folgenden Abbildungen wird das Betragsspektrum  $|E(f_x)|$  mit 2, 4, 7, und 12 Perioden gezeigt. Die Rechteckfolge  $E_0(f_x)$  ist wie oben definiert. Die Amplitude ist gleich 1 und die Periodenlänge auch 1. Die Fensterlänge ist gleich 2, 4, 7, und 12.





**Abbildung 28: reale Rechtecksignale mit verschiedenen Periodenlängen und zugehörige Spektren**



Ob das Spektrum des Realtestrasters  $E(f_x)$  kontinuierlich oder eher diskret ist, ist von der Fensterlänge  $L_0$  abhängig. Je größer der Fensterlänge ist, desto weniger werden die Linien seines Spektrums verschmiert.

### 4.3.5 Berechnung der Modulationsübertragungsfunktion

Nach der Bestrahlung der Rechteckraster und Bearbeitung des digitalen Bilderzeugungssystems wird am Ausgang wieder ein Rechteckbild mit dem schwächenden Kontrast dargestellt. Die Verhältnisse zwischen den Ausgangskontrast und Eingangskontrast vom Rechteckraster bilden die Kontrastübertragungsfunktion ( $K$ ). Die hat gleiche Rechnungsformel wie Modulationsübertragungsfunktion ( $M$ ). Das Formelzeichen für die Ortssequenz ist  $s$

$$K(s) = \frac{\text{Kontrast}_{\text{Ausgang}}(s)}{\text{Kontrast}_{\text{Eingang}}(s)} \quad (52)$$

Die  $K$  eines Linienpaar mit Breite  $2l$  enthält nicht nur die Grundfrequenz  $f=1/2l$ , sondern auch höhere harmonische Frequenzen. Deswegen hat Altar eine Korrekturformel gefunden, die Kontrastübertragungsfunktion für Rechtecksignale in die Modulationsübertragungsfunktion für Sinussignale umzurechnen.

Ein ideales Rechtecksignal  $e(x)$  wird durch eine Fourierreihe dargestellt, die nur Cosinusglieder enthält.

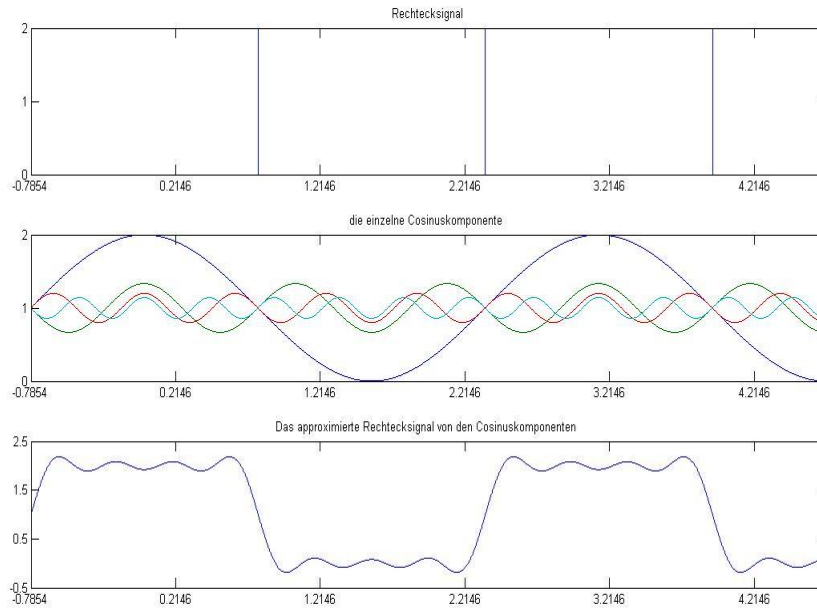
$$e(x) = m + A \frac{4}{\pi} \left[ \cos(2\pi f x) - \frac{1}{3} \cos 3(2\pi f x) + \frac{1}{5} \cos 5(2\pi f x) - \frac{1}{7} \cos 7(2\pi f x) + \dots \right]$$

$$M = s_o + s_u / 2 \quad A = s_o - s_u$$

$\nu$ : Ortsfrequenz,  $m$ : Mittelwert,  $A$ : Amplitude,  $S_o$ : obere Signalwert,  $S_u$ : untere Signalwert

(53)

Als ein Beispiel zeigt die Abbildung 29 das Prinzip der Fourier-Zerlegung für ein Rechtecksignal.



**Abbildung 29: Prinzip der Fourier-Zerlegung**

Aufgrund der Definition des Kontrasts (Gleichung 1) ergibt sich die Kontrastübertragungsfunktion  $K(s)$  des Rechtecksignals aus

$$K(s) = \frac{K_A}{K_E} = \frac{A_A(s) / M_A(s)}{A_E(s) / M_E(s)}. \quad (54)$$

Die Indizes A und E sind die Abkürzung für das Eingangssignal und das Ausgangssignal. Die Modulationsübertragungsfunktion  $M(f)$  ist nur für sinusförmige Signale definiert. Die Phasenverschiebung macht kein Einfluss auf  $M(f)$ . Die allgemeine Formel ist:

$$M(f) = \frac{M_A}{M_E} = \frac{A_A(f) / M_A(f)}{A_E(f) / M_E(f)} \quad (55)$$

Damit wird das Ausgangssignal  $a(x)$  durch Multiplikation jedes einzelnen Cosinus-Gliedes mit  $M(f)$  berechnet. Die Formel für ein vereinfachtes Rechtecksignal ohne Mittelwert am Ausgang sieht so aus:

$$a(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \left[ M(f) \cos(2\pi fx) - \frac{M(3f)}{3} \cos 3(2\pi fx) + \frac{M(5f)}{5} \cos 5(2\pi fx) - \frac{M(7f)}{7} \cos 7(2\pi fx) \dots \right] \quad (56)$$

Jede sinusförmige bzw. cosinusförmige Funktion hat ein Maximum bei Eins im Scheitelpunkt der Kurve und ein Minimum bei minus Eins. Daraus wird das Ausgangssignal  $a(x)$  durch die Kontrastübertragungsfunktion  $K(s)$  gezeichnet: Die Ortsfrequenz  $f$  ist numerisch gleich die Ortssequenz  $s$ . Die beide haben nur die unterschiedliche physikalische Bedeutung (4.3.1).

$$1) \quad K(s) = \frac{4}{\pi} \left[ M(f) - \frac{M(3f)}{3} + \frac{M(5f)}{5} - \frac{M(7f)}{7} + \frac{M(9f)}{9} \dots \right]$$

$$2) \quad K(3s) = \frac{4}{\pi} \left[ M(3f) - \frac{M(9f)}{3} + \frac{M(15f)}{5} - \frac{M(21f)}{7} + \frac{M(27f)}{9} \dots \right]$$

$$3) \quad K(5s) = \frac{4}{\pi} \left[ M(5f) - \frac{M(15f)}{3} + \frac{M(25f)}{5} - \frac{M(35f)}{7} + \frac{M(45f)}{9} \dots \right]$$

$$4) \quad K(7s) = \frac{4}{\pi} \left[ M(7f) - \frac{M(21f)}{3} + \frac{M(35f)}{5} - \frac{M(49f)}{7} + \frac{M(63f)}{9} \dots \right]$$

usw. (57)

Alle Gleichungen des obigen Gleichungssystems 46 werden nach  $M(kf)$  umgestellt:

$$1a) \quad M(f) = \frac{\pi}{4} K(s) + \frac{M(3f)}{3} - \frac{M(5f)}{5} + \frac{M(7f)}{7} - \frac{M(9f)}{9} + \dots$$

$$2a) \quad M(3f) = \frac{\pi}{4} K(3s) + \frac{M(9f)}{3} - \frac{M(15f)}{5} + \frac{M(21f)}{7} - \frac{M(27f)}{9} + \dots$$

$$3a) \quad M(5f) = \frac{\pi}{4} K(5s) + \frac{M(15f)}{3} - \frac{M(25f)}{5} + \frac{M(35f)}{7} - \frac{M(45f)}{9} + \dots$$

$$4a) \quad M(7f) = \frac{\pi}{4} K(7s) + \frac{M(21f)}{3} - \frac{M(35f)}{5} + \frac{M(49f)}{7} - \frac{M(63f)}{9} + \dots$$

usw. (58)

Das Element der Gleichung 1a) wird von der einzelnen Komponente des Gleichungssystems (47) ersetzt. Nach der Ersetzung werden die gleichen Elemente mit unterschiedlichem Vorzeichen eliminiert; z.B. die Elemente  $M(3f)$  von 1a) wird durch die Gleichung 2a) ersetzt. Daraus ergibt sich:

$$M(f) = \frac{\pi}{4} K(s) + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\pi}{4} K(3f) + \cancel{\frac{M(9f)}{3}} - \frac{M(15f)}{5} \dots \right) - \frac{M(5f)}{5} + \frac{M(7f)}{7} - \cancel{\frac{M(9f)}{9}} + \dots \quad (59)$$

Die Element  $M(9f)/9$  mit Minus- und Pluszeichen wird eliminiert. Zum Schluss ergibt aus der Gleichung 58,1a) die Altar-Korrekturformel:

$$M(f) = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ K(s) + \frac{K(3s)}{3} - \frac{K(5s)}{5} + \frac{K(7s)}{7} - \frac{K(11s)}{11} \dots + F_k \cdot \frac{K(ks)}{k} + \dots \right] \quad (60)$$

Das Vorzeichen jedes einzelnen Gliedes wird von  $F_k$  bestimmt. es gilt

$$F_k = (-1)^m (-1)^{\frac{k-1}{2}} \quad \text{für } m = p$$

$$F_k = 0 \quad \text{für } m \neq p$$

mit folgender Erklärung:

Eine ungerade Zahl  $k$  kann durch Primzahlen zerlegt werden. Die Anzahl der benutzten Primzahlen von  $k$  ist  $m$ . Der Buchstabe  $p$  zeigt die Zahl der verschiedenen Primzahlen bei der Primzahlenzerlegung

Zum Beispiel:  $k = 9$  Die Primzahlenzerlegung ist  $3 \cdot 3 = 9$

-Die Zahl 9 wird in  $m = 2$  Primzahlen zerlegt.

-Die verschiedene Primzahl ist  $p = 1$

$m$  ist nicht gleich  $p$ . Dadurch wird  $F_k$  gleich null. Das Glied  $\frac{\pi}{4} \cdot \frac{r(9n)}{9} = 0$

kommt nicht in die Gleichung vor.

Bei der Messung wird nur der Kontrast bis zum 5. Summanden berücksichtigt.

Dann wird die Reihe der Korrekturformel abgebrochen [7].

### 4.3.6 Optimales Bleistrichraster

Aus Abschnitt 4.3.5 ist bekannt, dass die Korrekturformel nur für ideale Bleistrichraster gilt. Das Ortsfrequenzspektrum eines idealen Bleistrichrasters ist ein Linienspektrum. Es gibt keine Verschmierung auf den Linien. Aber es ist praktisch nicht realisierbar. Das Ortsfrequenzspektrum eines realen Bleistrichrasters zeigt immer eine Verschmierung der Linien. Der Linientestraster, der nur aus einzelnen Linienpaar mit jeweils abnehmender Linienpaarbreite besteht, ist überhaupt nicht geeignet für die Berechnung der Modulations-

übertragungsfunktion.

Der Gruppentestraster besteht aus mehreren Linienpaaren mit gleicher Breite. Und dann werden die Gruppen mit abnehmender Breite zusammengestellt. Je größer die Anzahl der Linienpaare in einer Gruppe ist, desto weniger werden die Linien seines Spektrums verschmiert. Deshalb ist der Gruppentestraster geeignet für die Berechnung der Modulationsübertragungsfunktion. Wünschenswert sind jedoch möglichst viele Linien in einer jeden Gruppe, damit das Linienspektrum wenig verschmiert wird. Bei der Konstruktion des Gruppentestrasters muss ein Kompromiss zwischen der Annäherung an das Linienspektrum und dem Abmaß des Gruppentestrasters gefunden werden

## 5 Experimentelle Untersuchungen

### 5.1 Speicherfoliensystem

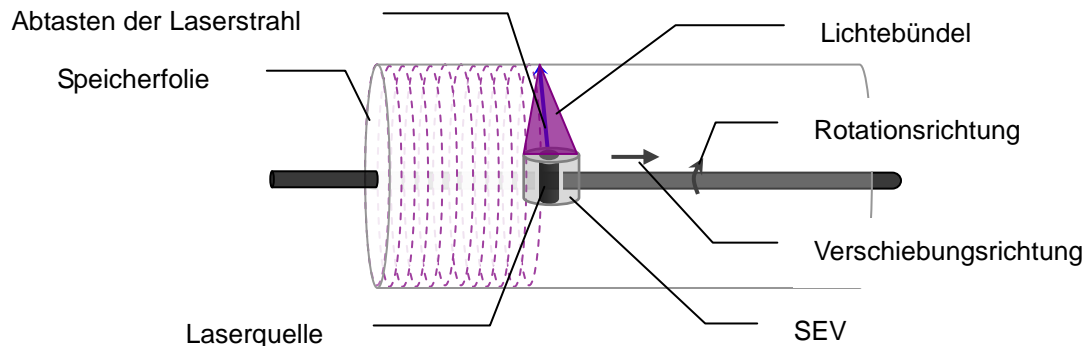
#### 5.1.1 Aufbau

Ein Speicherfoliensystem kombiniert löschbare Speicherfolien, einen Laserscanner, und eine PC-basierte Betrachtungsstation in einem Paket. Speicherfolien besitzen eine Phosphoreszenzschicht (BaFBr: Eu, O). Die nach Anregung durch Röntgenstrahlung nicht sofort luminesziert, sondern ein latentes Bild im Form angeregter Elektronen speichert. Je nach Schwächung der Strahlenintensität durch das Phantom werden die Speicherkristalle unterschiedlich angeregt. Das latent gespeicherte Röntgenbild wird mit einem Laserstrahl Punkt für Punkt abgetastet. Das dabei entstehende Phosphoreszenzlicht wird durch Lichtleiter übertragen und mit einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) gemessen. Die emittierte Lichtmenge ist proportional der bei der Exposition dort übertragenen Strahlenenergie. Mit UV-Licht kann die Folie zum Schluss vollständig gelöscht und wieder verwendet werden. Das Institut für Biomedizinische Technik und Informatik der TU Ilmenau benutzt das KODAK Point-of-Care CR 360 (Poc-Cr360) System.



Abbildung 30: KODAK Point-of-Care CR 360

Zur Auswertung wird die Speicherfolienkassette mit der Speicherfolie in das Lesegerät (Poc-CR360) geschoben. Die Speicherfolie wird aus der Kassette entnommen und mit Laser abgetastet. Nach dem Löschmodul wird die Speicherfolie wieder in der Speicherfolienkassette untergebracht.



**Abbildung 31: Ausleseeinrichtung für Speicherfolie**

Beim Auslesen wird die Folie im Lesegerät fixiert. Der Laser-Scanner und der Lichtdetektor rotieren gemeinsam, um die Folie abzutasten.

Die Speicherfolie selbst zeigt noch keine Matrixstruktur. Die eigentliche Digitalisierung der Bildinformation erfolgt erst im Prozess des Abtastens mit dem Laserscanner. Die Exposition von Speicherfolien erfordert keine Änderungen am Röntgenstrahlenerzeuger und am Anwendungsgerät.

### **Kodak PoC CR 360 [9]**

Durchsatz:	max.61 Kassetten pro Stunde (35×43 cm)
Zeit bis zum ersten Bild:	38 Sekunden
Graustufenauflösung:	Erfassung: 16 Bit pro Pixel Anzeige: 12 Bit pro Pixel
Abmessung(H×B×T):	33.7 cm × 75 cm × 55.5 cm
Gewicht:	39 kg
Systemkonfiguration:	Tischgerät; Z-Cart(Gerätewagen)
Stromversorgung:	einphasig, 50 Hz, 240 V~, 4 A
Sicherheits- und behördliche Genehmigungen:	FDA CE cTUVus

## 5.1.2 Übertragungseigenschaften

Statisches Verhalten, Homogenität, und Orts- und Richtungsinvarianz des Speicherfoliensystems werden in diesem Kapitel untersucht.

### Fokusunschärfe

Ein dreidimensionales Objekt wird zentral auf die zweidimensionale Bildebene projiziert. Der geometrische Vergrößerungsfaktor (V) ist der Quotient vom Fokus-Film-Abstand (FFA) und dem Fokus-Objekt-Abstand (FOA). Eine große Strahlenquelle (Fokus) führt zu einer Fokusunschärfe (U). Die ist von Vergrößerungsfaktor und Fokusgröße (F) abhängig [2]. Für diese gilt:

$$U = \left( \frac{FFA}{FOA} - 1 \right) \cdot F \quad (61)$$

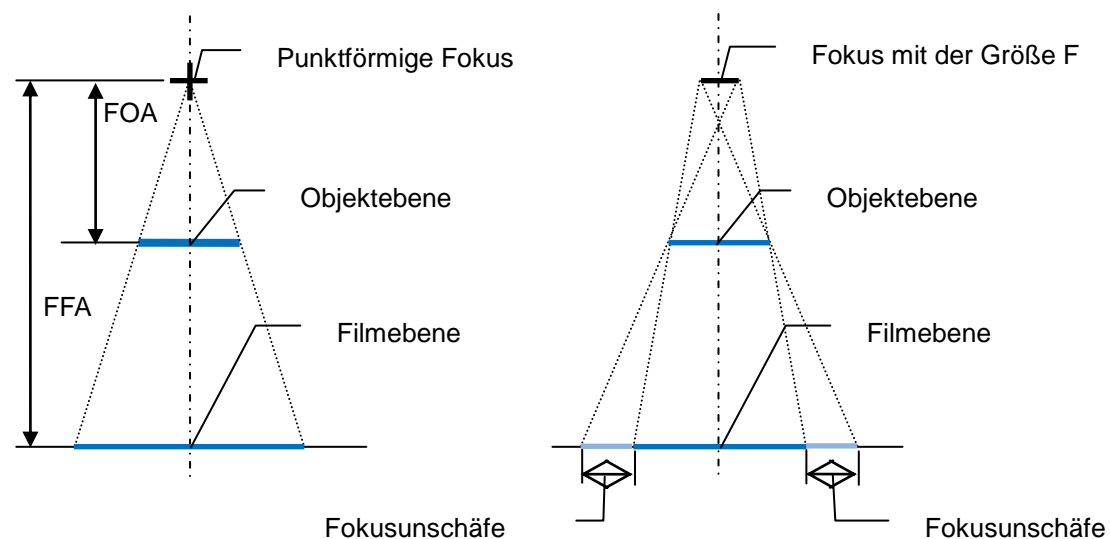


Abbildung 32: Geometrische Fokusunschärfe

Um die Fokusunschärfe zu vermeiden, sollte der Vergrößerungsfaktor ange-nähert Eins werden. Für die Anfertigung der Röntgenaufnahmen ist der Fo-kus-Film-Abstand 100 cm. Die Testraster werden direkt auf die Speicherfoli-enkassette gelegt. Die Fokusunschärfe ist damit Null.



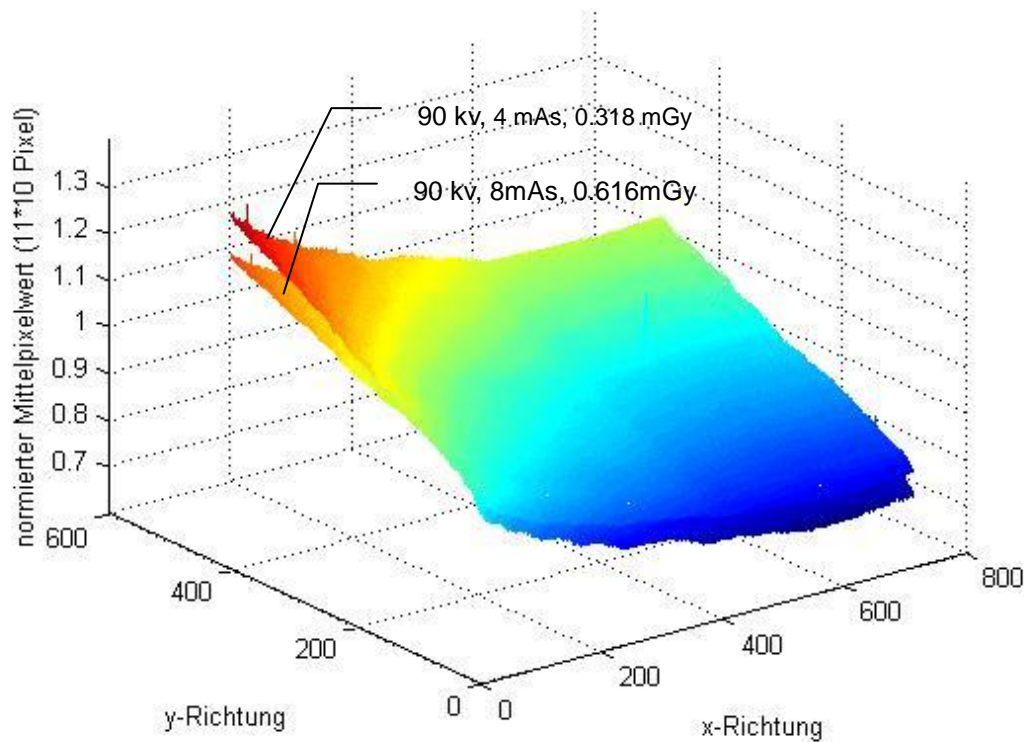
## Homogenität

Um die Homogenität der Speicherfolie zu untersuchen, wird eine Leerbildaufnahme angefertigt. Ein homogenes Strahlenfeld wird auf das vollständige Kassettenformat eingeblendet. Bei gleicher Spannung mit unterschiedlichem mAs-Produkt sowie mit unterschiedlicher Spannung und mAs-Produkt bei ähnlicher Luftkerma wird die Speicherfolie exponiert. Die Luftkerma wird gemessen. Das mAs-Produkt ist das Produkt aus Röhrenstrom (mA) und Belichtungszeit (s).

Fokus-Film-Abstand	100 cm		
Schwächungskörper	ohne		
Aufnahme 1			
Röhrenspannung:	90 kv		
mAs-Produkt	4 mAs	8 mAs	
Aufnahme 2			
Luftkerma	0.418 mGy	0.328 mGy	0.318 mGy
Röhrenspannung	50 kv	70 kv	90 kv
mAs-Produkt	16 mAs	8 mAs	4 mAs

**Tabelle 1: Versuchsparameter Leerbildaufnahme (Speicherfoliensystem)**

Homogenität bei unterschiedlichen mAs-Produkten und gleichen Spannungen



Homogenität bei unterschiedlichen Spannungen und ähnlicher Dosis Ka

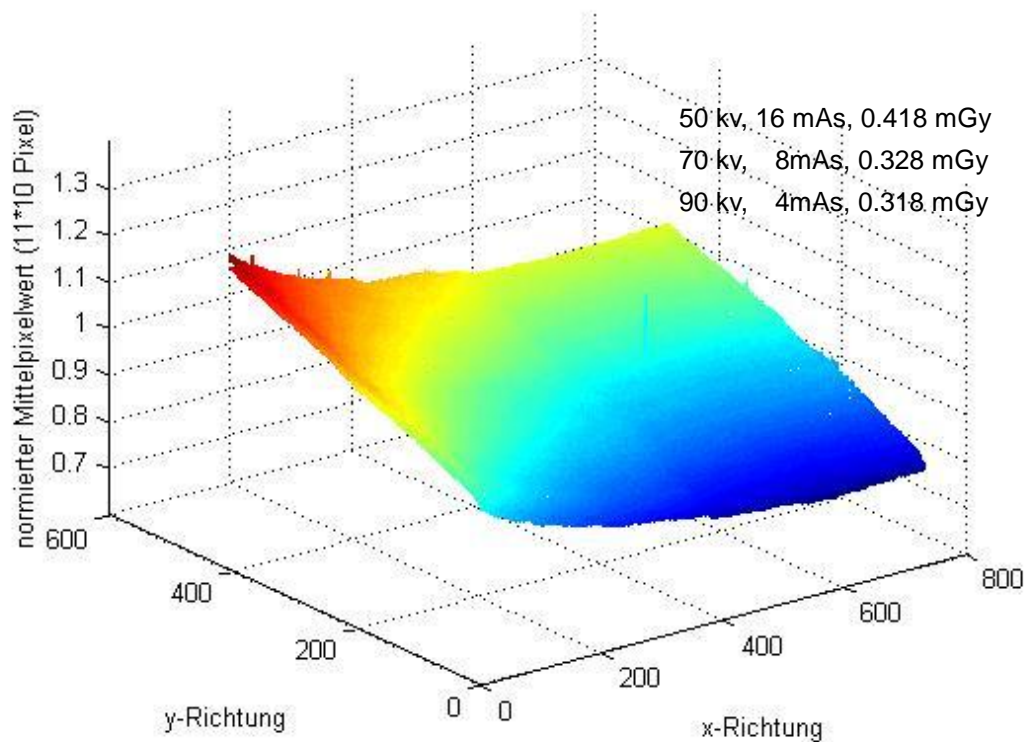
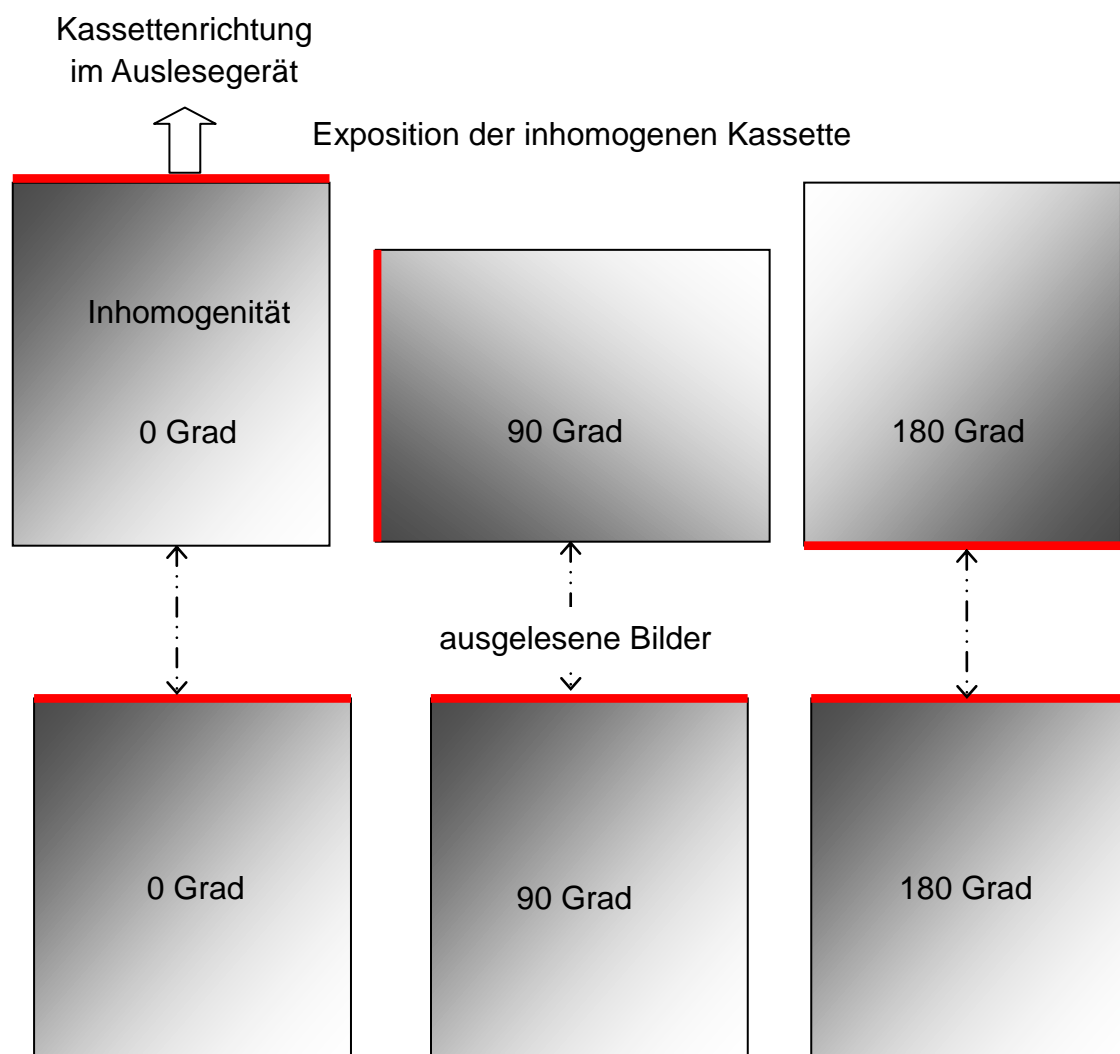


Abbildung 33: Homogenitätsprüfung (Speicherfoliensystem)

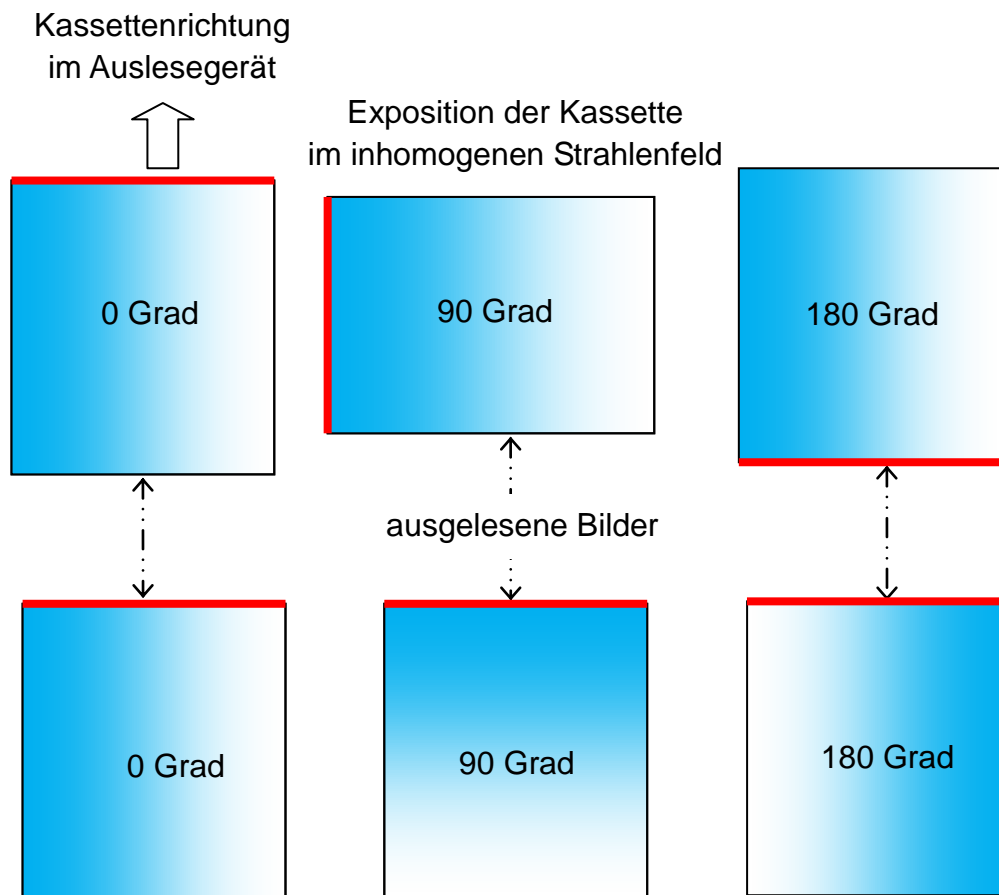
Um das Rauschen zu unterdrücken, wird der Mittelwert von jeweils 11\*10 Pixelfeldern berechnet und dargestellt.

Die Abbildung 33 hat deutlich gezeigt, dass die Speicherfolie keine ideale Homogenität besitzt. Der Mittelpixelwert wird von links nach rechts immer kleiner und von oben nach unten immer größer. Aber bei gleicher Spannung sehen die normierten Mittelpixelwerte von beiden mAs-Produkten ähnlich aus. Der größte Unterschied ist 10%. Und bei ähnlicher Dosis  $K_a$  stimmen die drei Aufnahme fast überein.

Ob die Inhomogenität durch das Strahlenfeld (Heel - Effekt) oder das Speicherfoliensystem selbst oder durch beide Einflüsse verursacht wird, soll ein zusätzlicher Versuch zeigen:



**Abbildung 34: Verdrehte Kassette bei homogenem Strahlenfeld**

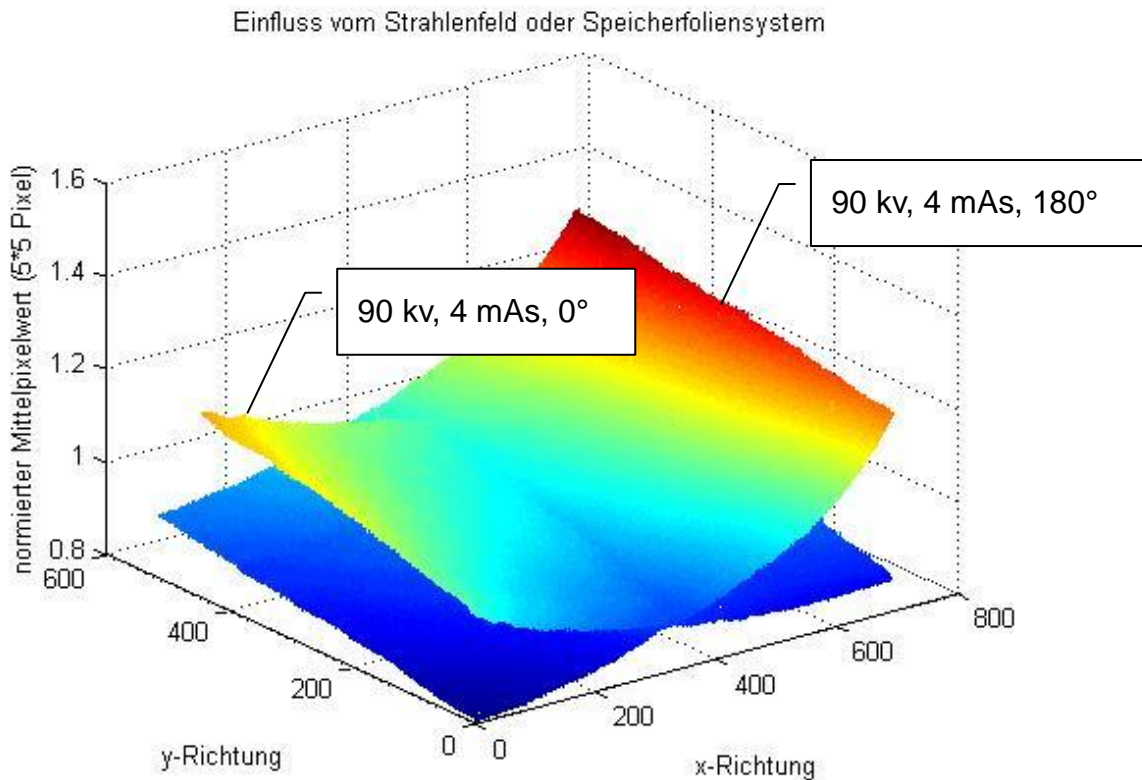


**Abbildung 35: Verdrehte Kassette bei inhomogenem Strahlenfeld**

Wenn für eine Inhomogenität ausschließlich die Speicherfolie verantwortlich wäre, dann dürfte sich deren Verdrehung bei der Exposition auf die im Bild sichtbare Inhomogenität nicht auswirken.

Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	Ohne
Röhrenspannung:	90 kv
mAs-Produkt	4 mAs
Aufnahme 1	
Position der Speicherfolienkassette	Mitte, 0 Grad
Aufnahme 2	
Position der Speicherfolienkassette	180 Grad gedreht

**Tabelle 2: Versuchsparameter Einfluss vom Strahlenfeld (Speicherfoliensystem)**

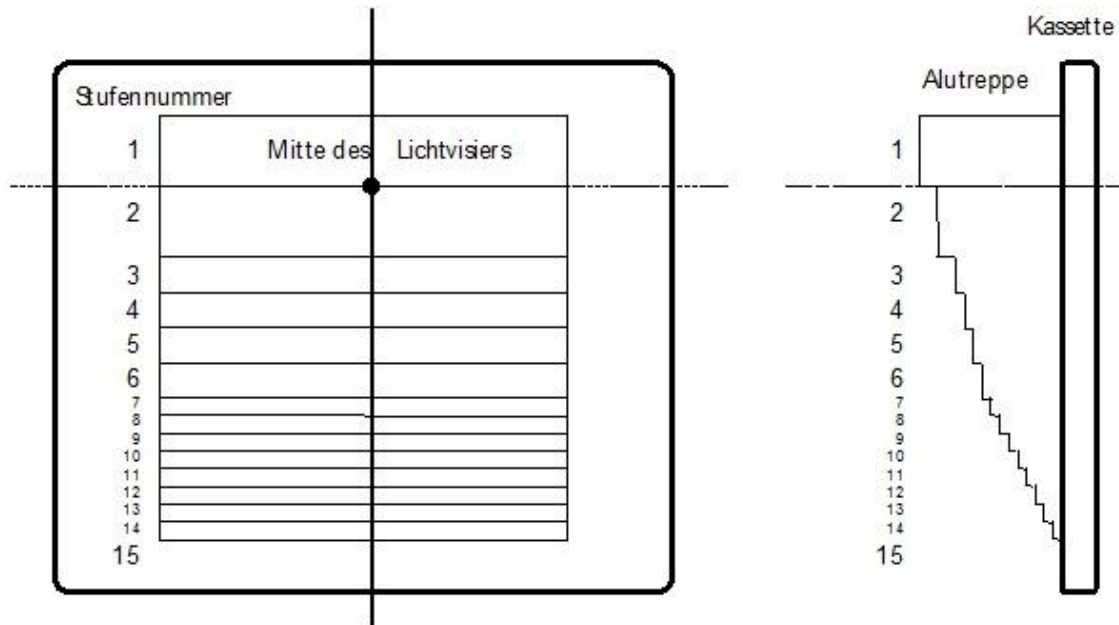


**Abbildung 36: Homogenität (Speicherfoliensystem)**

Bei Verdrehung der Speicherfolienkassette verändert sich die Inhomogenität. Das Ergebnis ist aber nicht ideal symmetrisch. Das Speicherfoliensystem hat damit ebenfalls Einfluss auf die Inhomogenität wie auch das inhomogene Strahlenfeld. Daraus folgt das Fazit: Die Speicherfolie besitzt keine ideale Homogenität. Die Inhomogenität ist aber weitgehend unabhängig von der Quantenenergie (Spannung) und von der Dosis (mAs). Die weiteren Einflüsse sind in der weiterführenden Themenbearbeitung zu klären.

### **Statisches Verhalten**

Das statische Verhalten wird von einer Aluminiumtreppe mit 14 Stufen getestet. Die wird direkt auf Speicherfolienkassette gelegt und bestrahlt. Die korrekte Positionierung der Aluminiumtreppe wird in Abbildung 37 dargestellt.

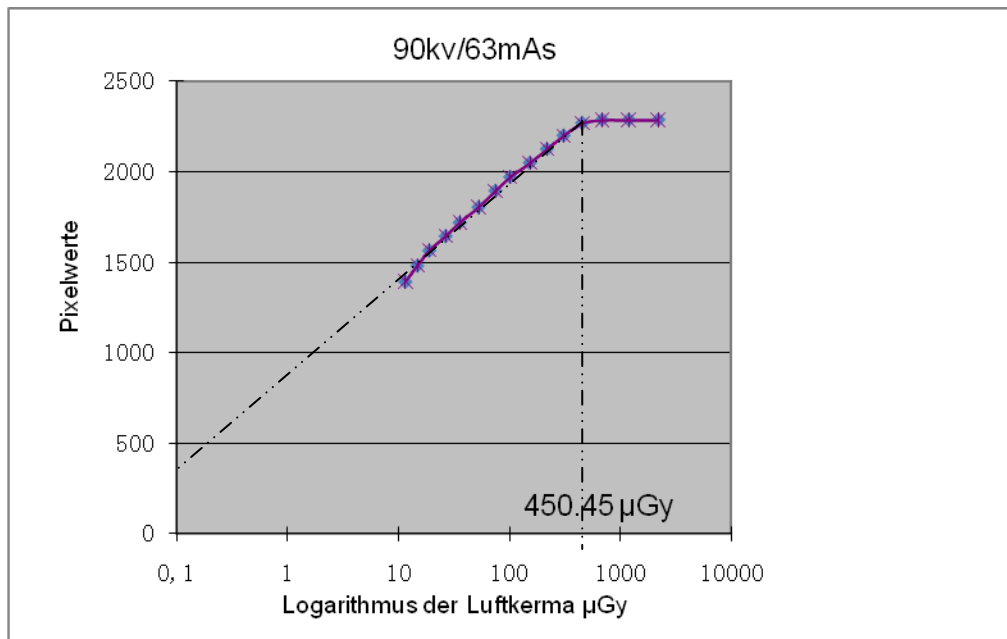


**Abbildung 37: Aluminiumtreppe auf der Kassette [14]**

Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	ohne
Röhrenspannung:	90 kv
mAs-Produkt	63 mAs

**Tabelle 3: Versuchsparameter statisches Verhalten (Speicherfoliensystem)**

Zur Auswertung wird der Mittelwert von jeder Stufe ermittelt. Sie werden über dem dekadischen Logarithmus der Luftkerma  $K_a$  aufgetragen. Wie beim Röntgenfilm ist auch das digitale Röntgenbild immer negativ dargestellt. D.h. die 15. Stufe ist Luft. Hier ist die maximale Dosis. Auf dem Monitor wird die 15. Stufe schwarz angezeigt. Der Pixelwert ist auch minimal. Um das statische Verhalten richtig darzustellen, werden die Pixelwerte in positive Werte umgerechnet.



**Abbildung 38: statisches Verhalten (Speicherfoliensystem)**

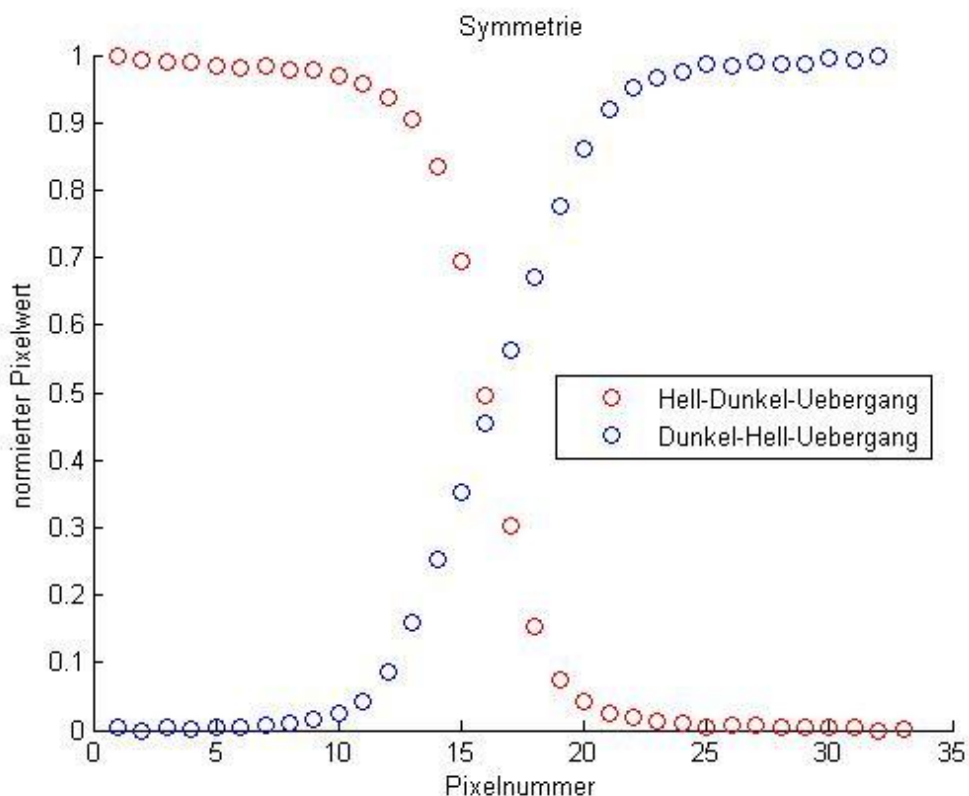
### Invarianzprüfung

Ein letzter Test des Speicherfoliensystems ist die Invarianzprüfung, ob das System Symmetrie, Verschiebungsinvarianz und Verdrehungsinvarianz zeigt. Die Kante wird als Testphantom benutzt. Mit Hilfe der Phantomhaltung wird die Kante in genauer Position gehalten. Das vermeidet geometrische Fehler. Die Zeichnung der Phantomhaltung findet sich in der Anlage.

Für die Symmetrie-Prüfung wird ein Hell-Dunkel-Übergang gemessen. Und danach an gleicher Stelle ein Dunkel-Hell-Übergang gemessen. Entlang des Übergangs wird jeder Pixelwert der Pixelnummer zugeordnet. Es wird erwartet, dass die Kantenkurve des Dunkel-Hell-Übergangs wie eine 180°-Spiegelung der Kantenkurve des Hell-Dunkel-Übergangs aussieht.

Symmetrie-Prüfen	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	ohne
Röhrenspannung:	60 kv
mAs-Produkt	10 mAs
Phantomhaltung (Mikrometerschraube)	16 mm
Aufnahme 1	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal nach rechts
Aufnahme 2	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal nach links

**Tabelle 4: Versuchsparameter Symmetrie (Speicherfoliensystem)**



**Abbildung 39: Symmetrieverhalten (Speicherfoliensystem)**

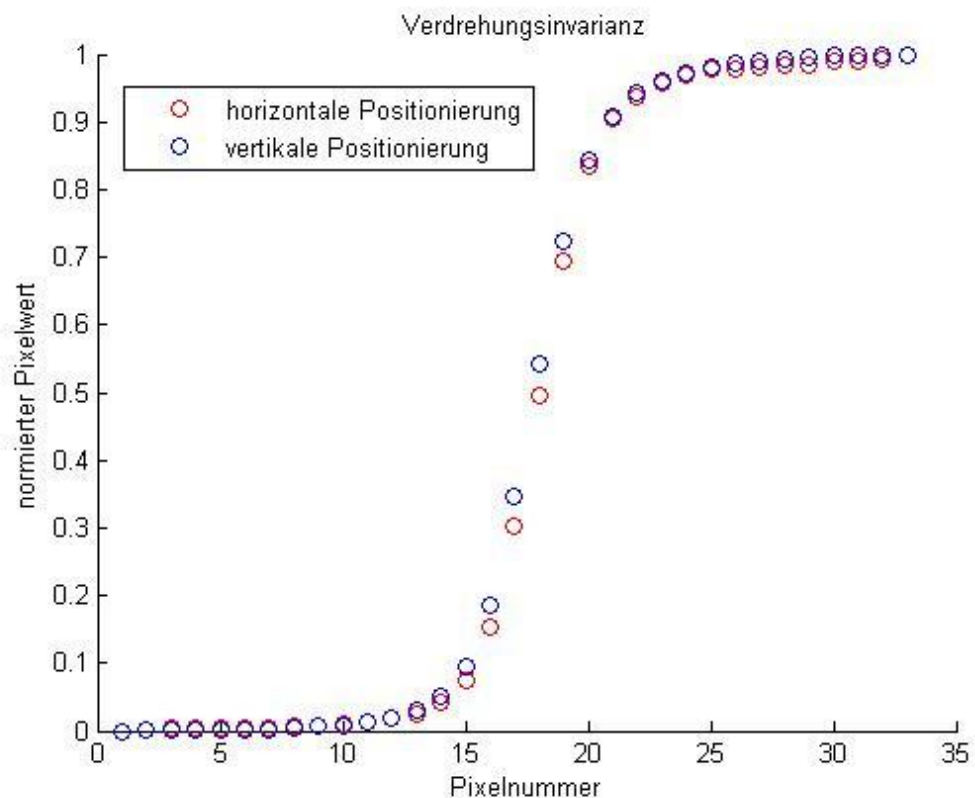
Das Messergebnis stimmt mit der Erwartung überein. Das Speicherfoliensystem ist symmetrisch.



Für die Prüfung der Verdrehungsinvarianz wird die Kante an gleicher Stelle einmal waagrecht und einmal senkrecht positioniert. Zur Vergleich wird die Kantenkurve immer entlang der horizontalen Richtung dargestellt.

Verdrehungsinvarianz-Prüfen	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	ohne
Röhrenspannung:	60 kv
mAs-Produkt	10 mAs
Phantomhaltung (Mikrometer-	16 mm
Aufnahme 1	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal
Aufnahme 2	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	vertikal

**Tabelle 5: Versuchsparameter Verdrehungsinvarianz (Speicherfoliensystem)**



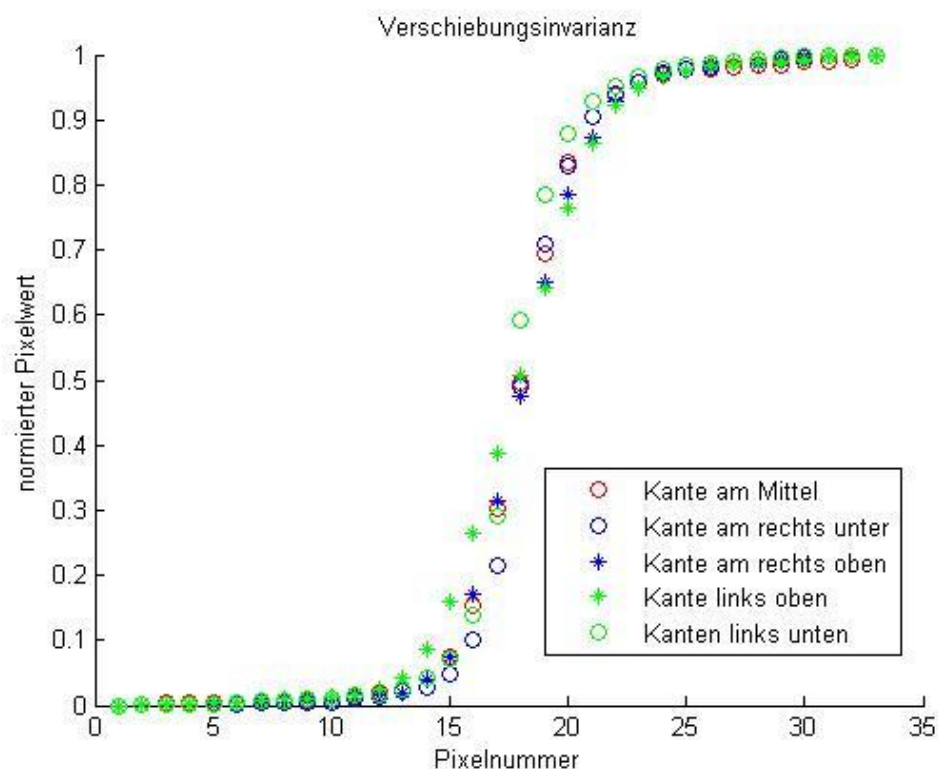
**Abbildung 40: Verdrehungsinvarianz (Speicherfoliensystem)**

Die Abbildung 38 zeigt, dass die Verdrehung keinen Einfluss auf das Kantenbild hat. Das Speicherfoliensystem verhält sich isotrop.

Die Kante wird am Rand positioniert und mit dem Kantenbild der Bildmitte verglichen vergleicht. Daraus wird die Verschiebungsinvarianz geprüft.

Verschiebungsinvarianz-Prüfen	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	ohne
Röhrenspannung:	60 kv
mAs-Produkt	10 mAs
Phantomhaltung (Mikrometer-	16 mm
Aufnahme 1	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal
Aufnahme 2	
Kantenposition	am Rand
Kantenrichtung	horizontal

**Tabelle 6: Versuchsparameter Richtungsinvarianz (Speicherfoliensystem)**



**Abbildung 41: Verschiebungsinvarianz (Speicherfoliensystem)**

Die Tendenz den vier Kantenkurven stimmt überein. Nur der Pixelwert ist unterschiedlich. Der Grund dafür ist, dass die ganze Speicherfolienfläche nicht homogen ist. Aber die örtliche Dynamik der Speicherfolie ist isoplan.

### **5.1.3 Besonderheiten indirekter digitaler**

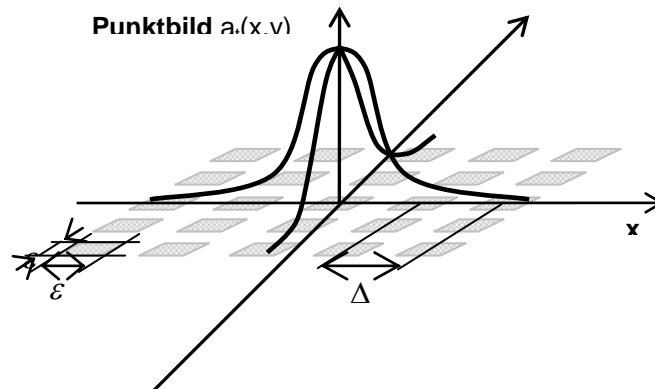
#### **Röntgenbildwandler**

Das Speicherfoliensystem besitzt wie alle digitalen Röntgenbilderzeugungssysteme mit indirekter Bildwandlung zwei Wandlerstufen. Die Erste ist eine analoge Wandlerstufe (amorpher Leuchtstoff). Die zweite ist die digitale Wandlerstufe (Laserscanner). Es gibt keine Möglichkeit, das Übertragungsverhalten der Wandlerstufe separat zu messen, da ohne genaue Kenntnis des Übertragungsverhaltens der 1. Wandlerstufe keine bekannten Testeingänge für den Eingang des Laserscanners möglich sind. Das Übertragungsverhalten der Wandlerstufe 2 muss idealisiert oder berechnet werden (Kapitel 2.6).

Die Signalübertragung digitaler bildgebender Systeme ist komplizierter als bei analogen Systemen. Aufgrund der Digitalisierung ist die Übertragung vom Eingangssignal nicht mehr stetig. Durch die Umsetzung analoger Werte in digitalisierte Werte (Bit) entsteht eine Treppenfunktion. Das Bit ist die kleinste digitale Informationseinheit. Digitale Bilder lassen sich über die Anzahl der Bits beschreiben. Ein 12Bit-Bild zeigt beispielsweise 4028 Farben oder Graustufen an. Über den Analog-Digital-Wandler wird jedem Analogwert ein digitalisierter Wert eindeutig zugeordnet. Die Treppenfunktion ist nicht kontinuierlich. Aber wenn die Digitalisierungsstufen fein genug sind kann die Treppenfunktion durch eine lineare Funktion angenähert werden.

Es ist auch schwerer die Modulationsübertragungsfunktion als Systemantwort eines digitalen bildgebenden Systems zu beschreiben. Die Invarianzen gelten unter Umständen nicht mehr. Der digitale Detektor hat Anordnung von Wandlerelementen bestimmter Form und Größe. Aufgrund der Beschaffenheit der Pixel- und Matrixstruktur ist das digitale System richtungsabhängig und Orts-

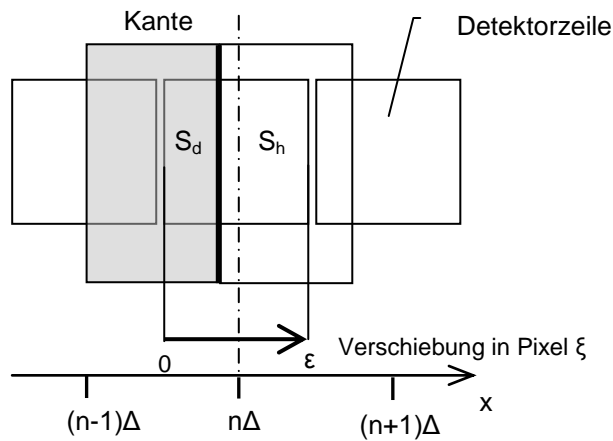
abhängig. Dies liegt daran, dass die Matrix eine eigene Modulationsübertragungsfunktion hat [3]. Jede Fotodiode besitzt eine infinitesimal kleine Grundfläche  $\varepsilon \cdot \varepsilon$ . Der Abstand zwischen zwei benachbarten digitalen Detektoren ist  $\Delta$ . es gilt immer  $\varepsilon \leq \Delta$ . Die örtliche Abtastung wird anschaulich in Abbildung 42 dargestellt.



**Abbildung 42: Örtliche Abtastung vom Punktbild**

Der Wert des Signals wird nur an einer finiten Anzahl von Positionen vom digitalen Detektor ermittelt. Solche Position nennt man auch Stützstellen. Und aufgrund des Abtasttheorems kann nur das Eingangssignal mit Ortsfrequenzen bis höchstens  $1/(2\Delta)$  verlustfrei übertragen werden. Um eine Sinuswelle erfolgreich zu übertragen braucht es mindesten zwei Stützstellen pro Periodenlänge. Daher gibt es für jeden digitalen Messsensor einer Grenzfrequenz, bis zu der das Eingangssignal ohne Verfälschung wiedergegeben wird.

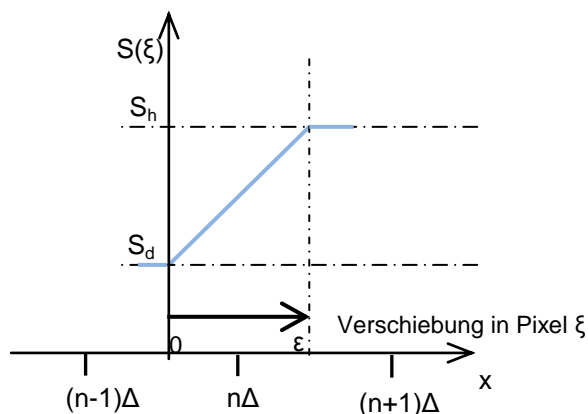
Jeder Stützstelle liefert am Ausgang ein Pixelwert. Der wird durch den Mittelwert über die ganze Pixelfläche berechnet. Eine ideale Kante wird senkrecht über einen Pixel gelegt. Dann bestimmt die Kantenposition der Pixelwert am Eingang. Er ändert sich zwischen dem Dunkelwert  $S_d$  und Hellwert  $S_h$ .



**Abbildung 43: Kantenlage innerhalb eines Pixels**

$$S(\xi) = \frac{1}{\varepsilon^2} \int_{-\frac{\varepsilon}{2}}^{\frac{\varepsilon}{2}} \int_{n\Delta - \frac{\varepsilon}{2}}^{n\Delta + \frac{\varepsilon}{2}} S(x, y) dx dy = \frac{1}{\varepsilon^2} \varepsilon [\xi S_d + (\varepsilon - \xi) S_h] \quad \text{und } \xi = [0, \varepsilon] \quad (62)$$

Mit zunehmende Bedeckungsstrecke  $x(\xi)$  des Pixels im Subpixelbereich wird der Pixelwert linear steigen.



**Abbildung 44: Ausgangssignal eines Pixels**

### 5.1.4 Analyse von Kantenbildern

Aus dem Abschnitt 2.5 ist bekannt, dass der Betrag der optische Übertragungsfunktion (OTF) die Modulationsübertragungsfunktion M ist. Die optische Übertragungsfunktion kann aus einem Kantenbild hergeleitet werden.

Eine Kante wird als Testeingang verwendet. In der Bildebene wird ein Dunkel-Hell-Übergang dargestellt. Das Kantenbild wird direkt von digitalisierten Bilddaten erzeugt. Entlang des Dunkel-Hell-Übergangs wird jeder Pixelwert

der Pixelnummer zugeordnet (s. Abbildung 12).

Die Kurve ist s-förmig. Um die weitere Berechnung durchzuführen, soll das Kantenbild von einem mathematischen Modell analytisch beschrieben werden. Im physikalischen Energieübertragungsprozess wird die Leuchtdichteverteilung als Systemantwort auf den Diracimpuls als Gewichtsfunktion bezeichnet. Sie entspricht der Form einer Gaußfunktion.

Da das Kantenbild das Integral der Gewichtsfunktion ist, wird derselbe mathematische Zusammenhang zur Modellierung der ESF benutzt. Die Gaußfunktion- Standardverteilung ist:

$$f(x) = e^{-x^2} \quad (63)$$

Eine Fehlerfunktion  $\text{erf}(x)$  wird durch eine integrierte Gaußfunktion beschrieben [11].

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx \quad (64)$$

Die Fehlerfunktion  $\text{erf}(x)$  kann weiter mit der Reihenentwicklung berechnet werden [11].

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{2n+1}}{(2n+1) \cdot n!} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{10} - \frac{x^7}{42} + \dots \right) \quad (65)$$

Aus Gleichung 62 wird die integrierte Standardverteilung durch  $\text{erf}(x)$  einfach beschrieben.

$$\int_0^x e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erf}(x) \quad (66)$$

um eine gute Annäherung zu errechnen, werden zusätzliche Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  eingefügt. Daraus ergibt sich die Gaußfunktion und die zugehörige integrierte Gaußfunktion:

$$\text{Gaußfunktion: } a \cdot e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2}$$

$$\text{Integrierte Gaußfunktion: } \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot a \cdot c \cdot \text{erf}\left(\frac{x-b}{c}\right) + d \quad (67)$$

Mit Hilfe des Kurven-Fittings von Matlab wird das Mathematische Modell an

die Messwerte angepasst. Die Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$  werden nach dem Fitting bestimmt. Je mehr Pixelwerte am Dunkel-Hell-Übergang liegen, desto genauer wird die Kurve berechnet.

Eine leicht schräggestellte Kante hat analoge Verhältnisse wie in Abbildung 12 dargestellt. Entlang einer Pixelspalte werden zusätzliche Stützstellen erzeugt. Jede zusätzliche Stützstelle muss aber im Subpixelbereich verschoben werden. Damit wird das Kantenbild mit mehr Messwerten ergänzt [3]. Die Abbildung 45 zeigt das Verschiebungsprinzip. Auf einer Pixelposition ( $m \cdot \Delta$ ) werden Fünf zusätzliche Stützstellen entstehen. Diese werden gleichmäßig auf eine Pixelabmessung  $\varepsilon$  verteilt. Praktisch gibt es keine genaue Information für die Pixelabmessung. Es wird angenommen, dass die Pixelabmessung gleich Pixelabstand ist.

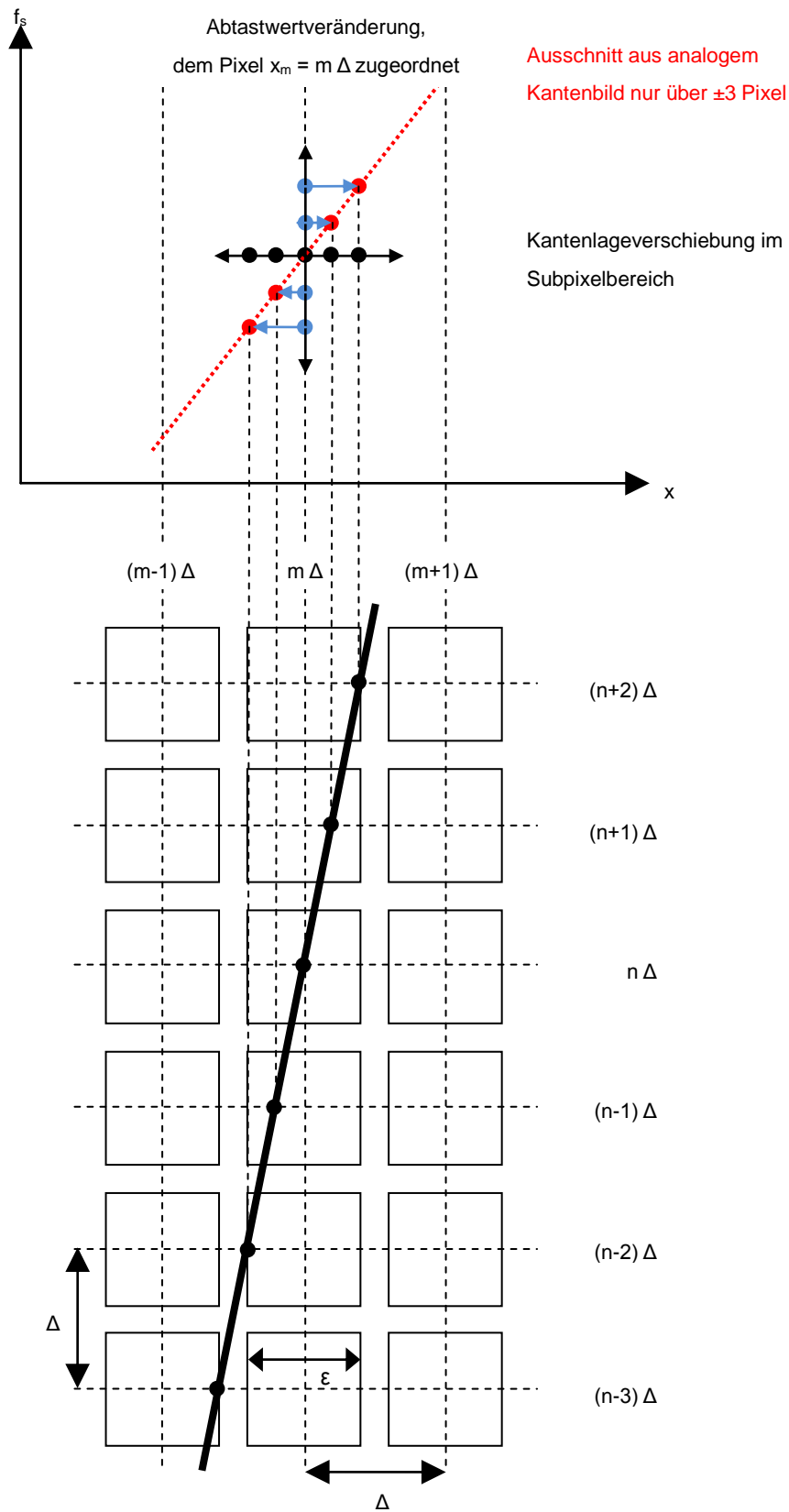


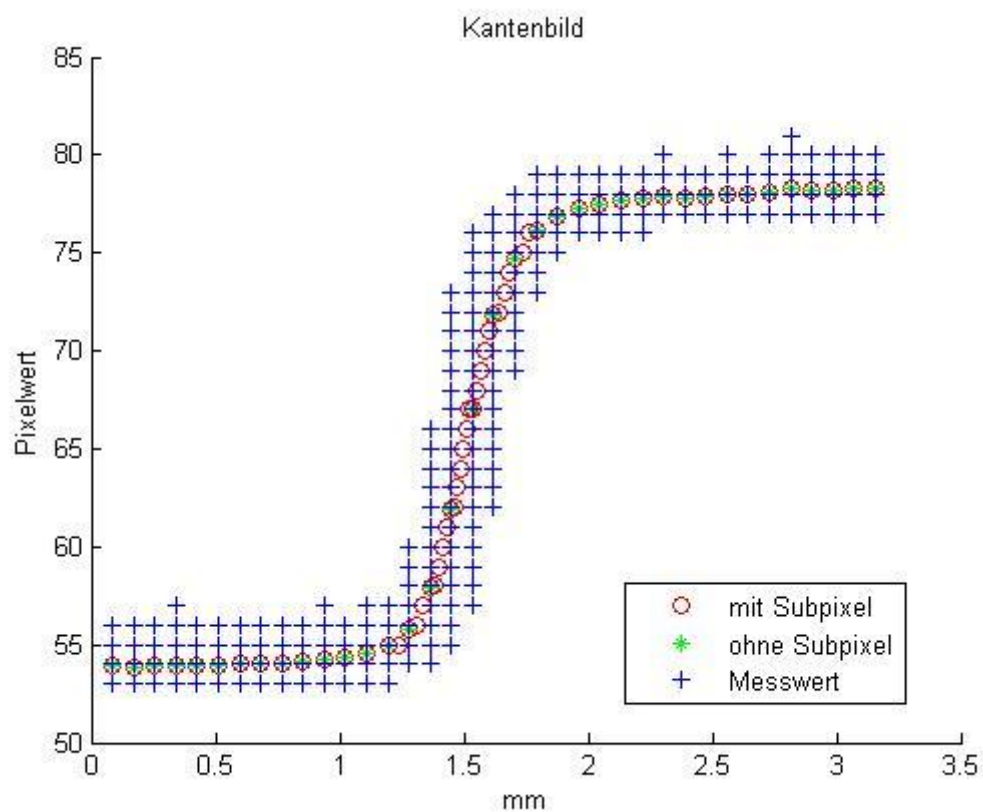
Abbildung 45: Verschiebung in Subpixelbereich



Für die Messung des Kantenbildes wird eine Kante mit  $0.05\ \mu\text{m}$  Pb eingesetzt

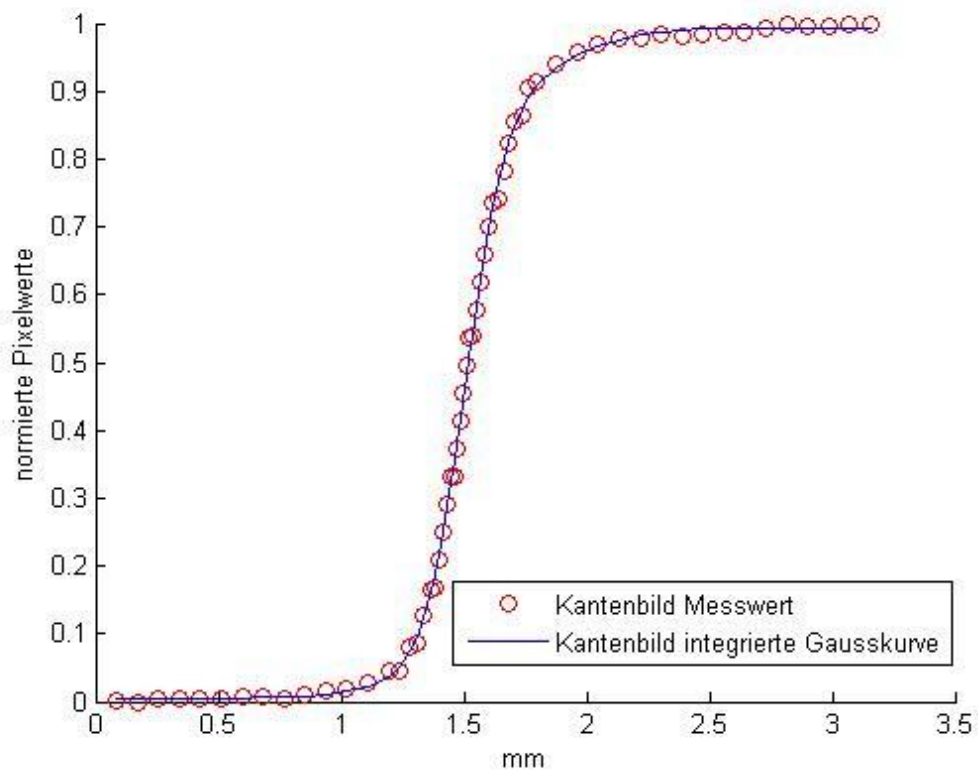
Kantenbild	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	ohne
Röhrenspannung:	60 kv
Röhrenstrom	10 mAs
Phantomhaltung (Mikrometerschraube)	16 mm
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal

**Tabelle 7: Versuchsparameter Kantenbild (Speicherfoliensystem)**



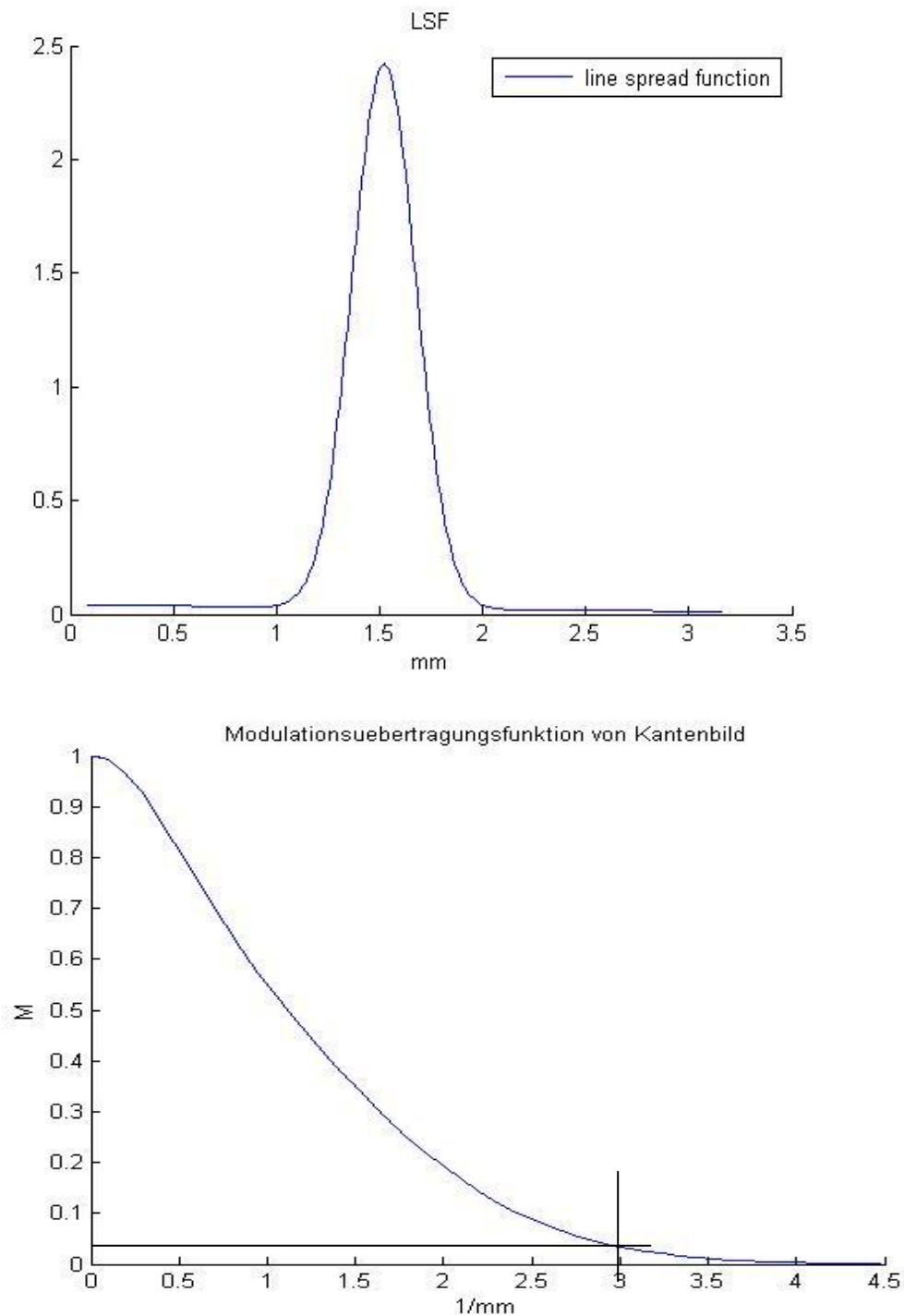
**Abbildung 46: Kantenbild (Speicherfoliensystem)**

Um die Modulationsübertragungsfunktion zu berechnen wird das Kantenbild zuerst auf Eins normiert und mit dem mathematischen Model analysiert.



**Abbildung 47: Kantenbild, Anpassung der Modellfunktion (Speicherfoliensystem)**

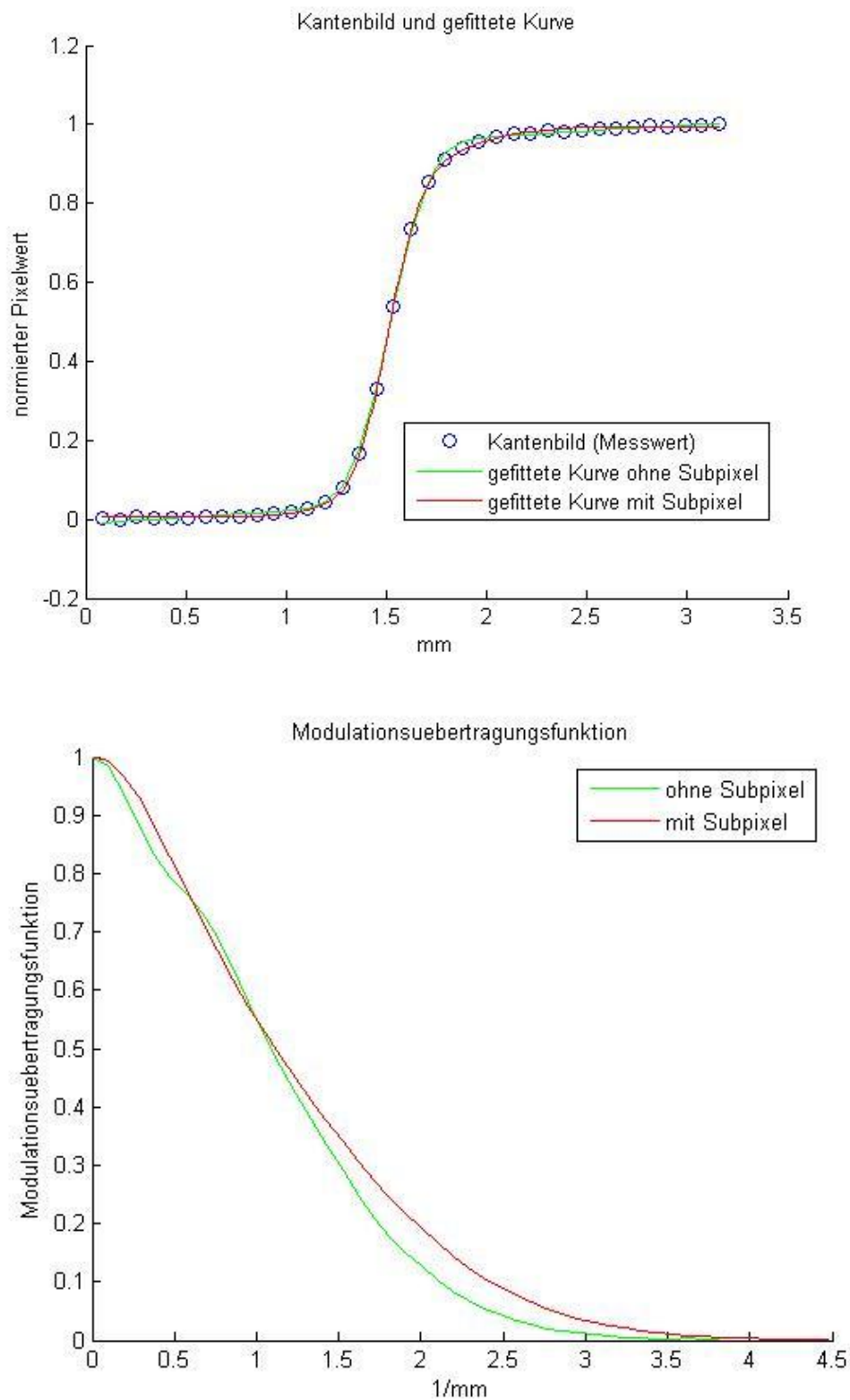
Durch die Nutzung des gefitteten Kantenbildes wird die Linienbildfunktion und optische Übertragungsfunktion weiter hergeleitet. Die Differentiation der Kantenbildfunktion ist die Linienbildfunktion. Die Fouriertransformierte von der Linienbildfunktion ist die optische Übertragungsfunktion. Die optische Übertragungsfunktion ist eine komplexe Funktion der (reellen) Ortsfrequenzen. Der Betrag ergibt die Modulationsübertragungsfunktion. Der komplexe Rechenprozess wurde mit Hilfe von Matlab durchgeführt. Es folgen die Ergebnisse.



**Abbildung 48: oben: LSF unten: Modulationsübertragungsfunktion (Speicherfolie)**

Die Auflösung reicht ungefähr bis  $4 \text{ mm}^{-1}$ . Bei  $2.95 \text{ mm}^{-1}$  wird die Modulationsübertragungsfunktion auf 0.04 absinken. Um zu zeigen, ob die Messwerte mit den zusätzlichen Stützstellen im Subpixelbereich einen Einfluss auf die

Berechnung der Modulationsübertragungsfunktion haben, werden beide Messungen in Abbildung 49 verglichen.



**Abbildung 49: Vergleich der Modulationsübertragungsfunktion ohne und mit Subpixel (Speicherfoliensystem)**

Die Ergänzung mit den zusätzlichen Messwerten im Subpixelbereich führt zu einer genaueren Anpassung der mathematischen Modellfunktion nach dem Kurvenfitting.

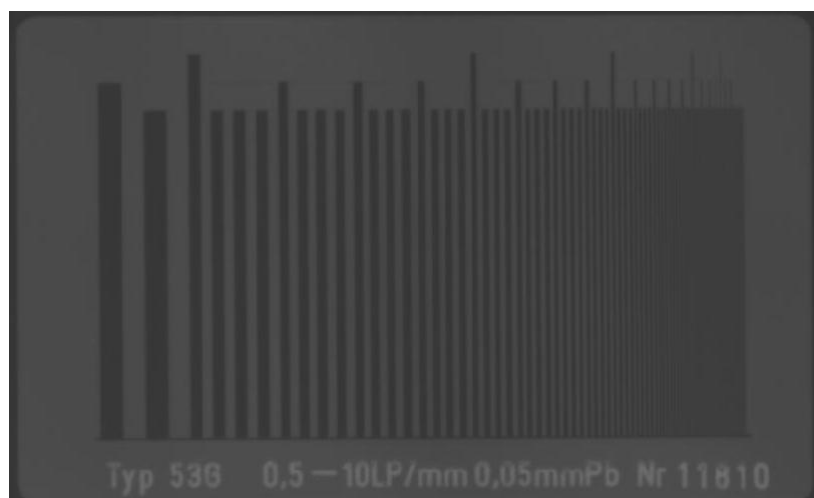
### 5.1.5 Analyse von Rasteraufnahmen

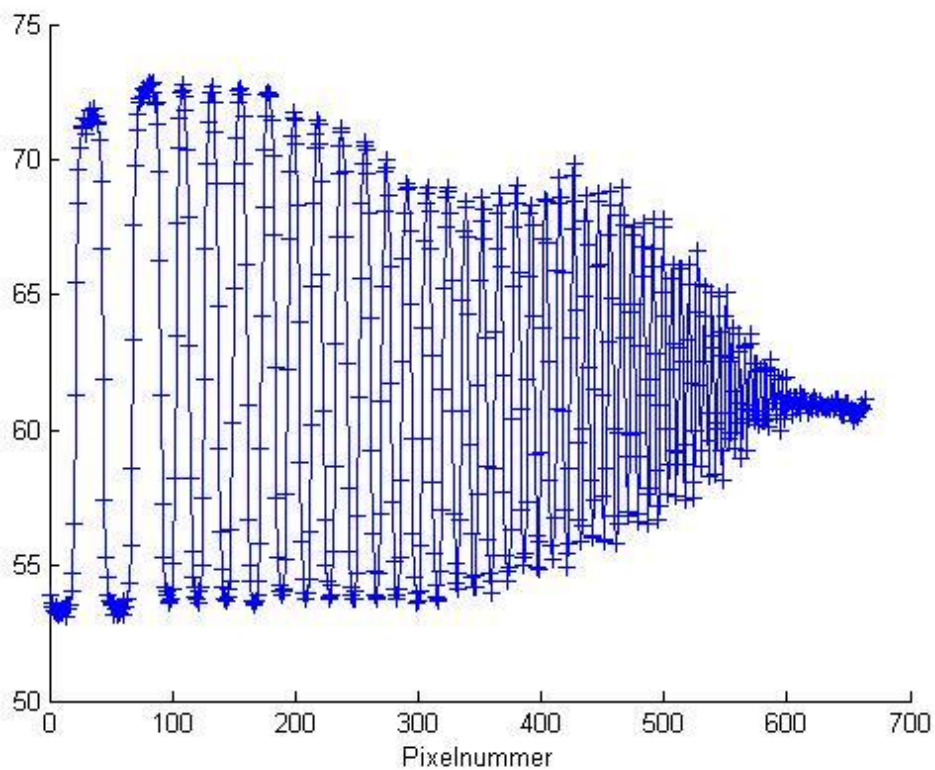
Aufgrund der Definition der Modulationsübertragungsfunktion (2.5.2) bietet sich eine andere Möglichkeit an, Modulationsübertragungsfunktion zu bestimmen. Der Bleistrichraster wird als Phantom verwendet.

Linienraster	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	ohne
Röhrenspannung:	60 kv
mAs-Produkt	10 mAs
Typ der Linienraster	Gruppentestraster Typ 538
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal

**Tabelle 8: Versuchsparameter Linienraster (Speicherfoliensystem)**

Nach der Röntgenaufnahme wird der Bleistrichraster als digitalisierten Bild-  
daten dargestellt. Es zeigt die dunklen und hellen Streifen an.

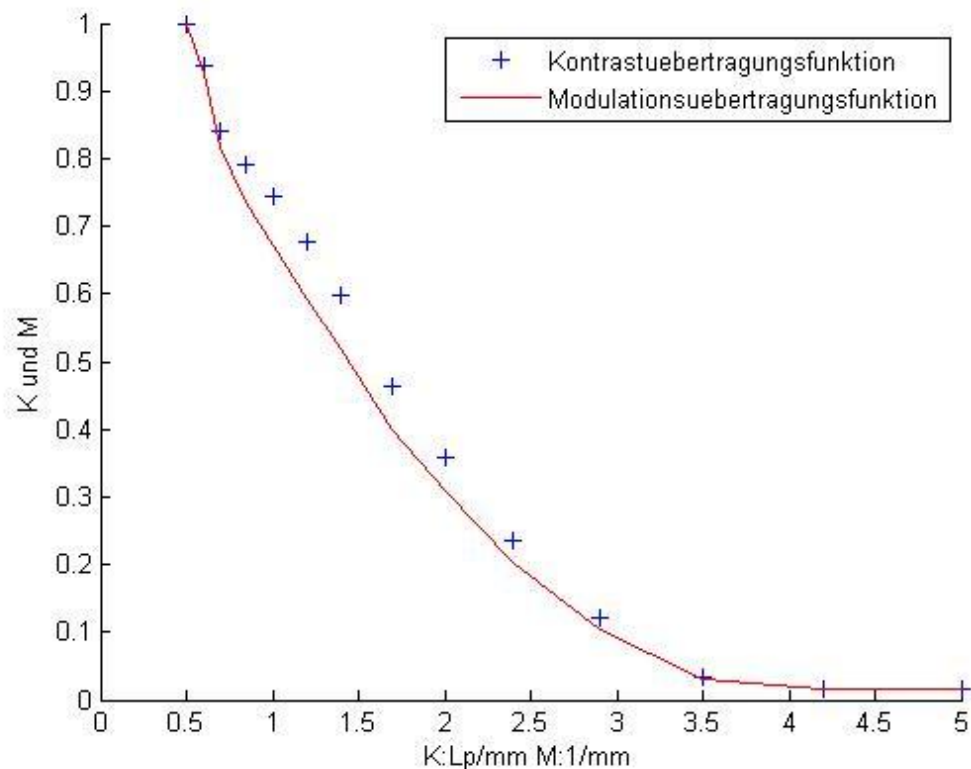




**Abbildung 50: oben: Gruppentestraster Typ 538  
unten: dazugehörige mittlere Pixelwerte (Speicherfoliensystem)**

Im Kapitel 5.2.2 wurde experimentell ermittelt, dass die Speicherfolienkassette keine ideale Homogenität besitzt und zusätzlich verursacht die Mechanik Streustrahlenanteile. Deswegen ist der Mittelwert, um den die Amplituden der Gruppentestraster schwanken, nicht konstant. Die Breite von jeder Linienpaargruppe ist bekannt. Dadurch wird die Ortssequenz einfach berechnet (4.3.1). Zur jeder Ortssequenz werden Maximalwert und Minimalwert der jeweiligen Gruppen erfasst und der entsprechende Kontrastübertragungsfaktor  $K(s)$  (Gleichung 52) hergeleitet. Da die Modulationsübertragungsfunktion für sinusförmig modulierte Strahlenbilder definiert ist, muss die Kontrastübertragungsfunktion nach der Altar-Korrekturformel in die Modulationsübertragungsfunktion umgerechnet werden. Das Gruppentestraster hat eine beschränkte Größe. Gemäß der Aussage der Kapitel 4.3.6 wird als kleinste Ortssequenz 0.5 Lp/mm benutzt. Und die Kontrast- und Modulationsübertragungsfaktoren werden auf den Wert von 0.5 mm bezogen und auf Eins nor-

miert.

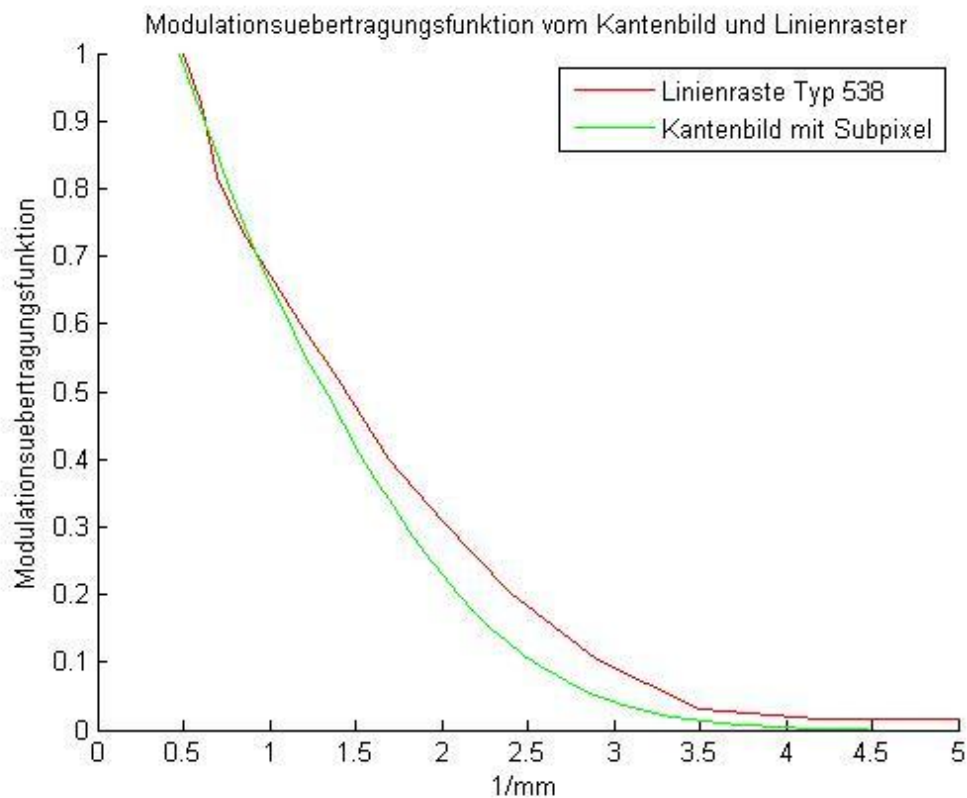


**Abbildung 51: K und M (Speicherfoliensystem)**

Um die Altar-Korrekturformel anzuwenden, werden für jede Ortsfrequenz die Kontrastübertragungsfaktoren bis praktisch zur 11. Oberwelle benötigt (4.3.5). Aber die Gruppentestraster haben eine maximale Ortssequenz, welche deutlich kleiner ist. Deswegen ist die Altar-Korrekturformel nur für niedrige Ortsfrequenzen genau. Für hohe Ortsfrequenzen kann wegen mangelnder Messwerte die Altar-Korrekturformel nicht mehr genutzt werden. In der Abbildung 49 ist deutlich gezeigt, dass die Kurve der Modulationsfunktion und der Kontrastübertragungsfunktion ab  $3 \text{ mm}^{-1}$  übereinander einen identischen Verlauf zeigen.

### 5.1.6 Vergleich der Modulationsübertragungsfunktionen

Der Teil der aus dem Kantenbild berechneten Modulationsübertragungsfunktion (ab  $0.5 \text{ mm}^{-1}$ ) wird ausgeschnitten und auf Eins normiert. Danach werden die beiden Kurven miteinander verglichen.



**Abbildung 52: Vergleich der Modulationsübertragungsfunktion vom Kantenbild und Linienraster Typ 538 (Speicherfoliensystem)**

Die Modulationsübertragungsfunktion aus dem Kantenbild fällt bei höheren Ortsfrequenzen schneller ab. Die Alter-Korrekturformel ist hierfür verantwortlich. Je höher die Ortsfrequenz ist, desto weniger wird der gemessene Kontrastübertragungsfaktor der Gruppentestraster korrigiert. Das Messverfahren von Rasteraufnahmen ist fehlerhaft und weniger gut geeignet für die Berechnung der Modulationsübertragungsfunktion. Es fehlen Messwerte bei hohen Ortssequenzen für die Umrechnung von der Kontrast- nach der Modulationsübertragungsfunktion. Und wie im Kapitel 4.3.4 gezeigt, ist das Ortsfrequenz-

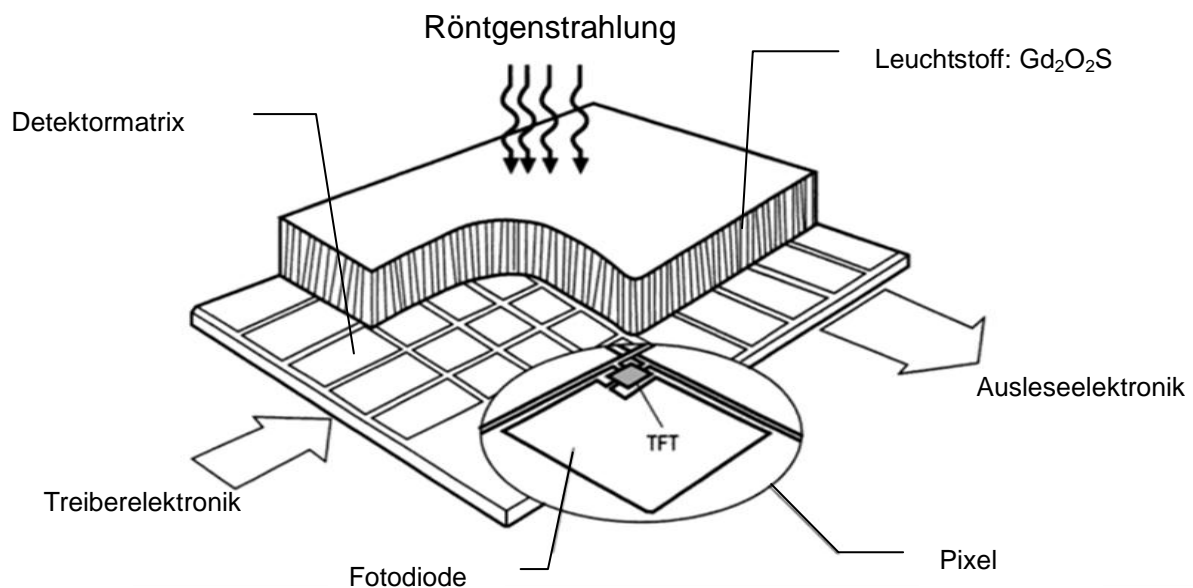


spektrum eines realen Bleistrichrasters (Gruppenraster) ein kontinuierliches und kein Linienspektrum. Dies ergibt einen weiteren Fehler bei der Korrektur nach Altar, weil die Werte im Vergleich zum idealen Linienspektrum systematisch zu klein sind.

## **5.2 Digitaler Flachbilddetektor**

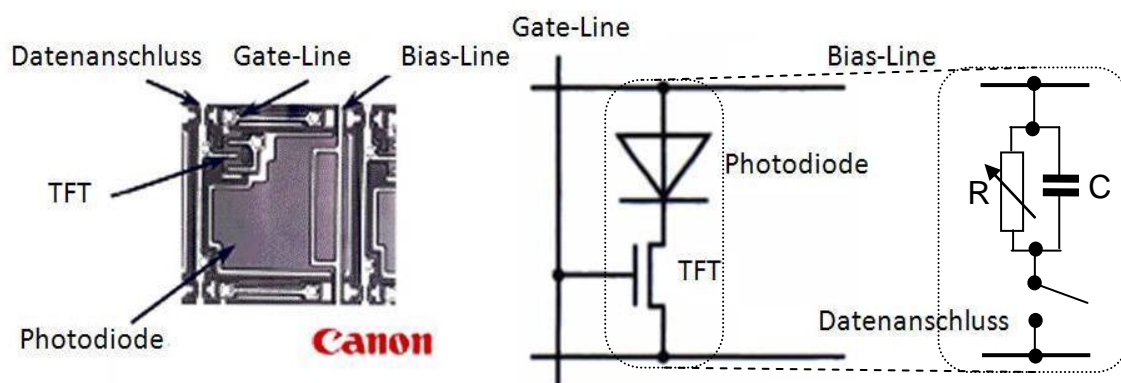
### **5.2.1 Aufbau**

Auch beim Flachbilddetektor wird das Bildsignal über den Umweg des sichtbaren Lichtes gewonnen. Der Flachbilddetektor besteht aus zwei Schichten: einer Szintillatorschicht und einer Fotodiodenmatrix mit einem Transistor-schalter-Array. Der Szintillator dient zur Umwandlung von Röntgenstrahlung in sichtbares Licht. Das Material des Szintillators ist Cäsiumjodid ( $\text{CsJ}$ ) oder Gadoliniumoxisulfid ( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ). Der Szintillator kann eine Vorzugsstruktur besitzen. CsJ wird zu nadelförmigen, senkrecht zur Detektoroberfläche angeordneten Kristallen aufgedampft. Damit wird eine seitliche Abstrahlung des Fluoreszenzlichtes unterdrückt. Solche Szintillatorschichten erreichen eine hohe Ortsauflösung auch bei dicken Szintillatorschichten. Die Fotodiodenmatrix befindet sich unter der Szintillatorschicht. Die Fotodiode wandelt das eintreffende Licht in elektrischen Ladungen um. Durch ein Transistorschalter-Array werden die Ladungen weiter geleitet.



**Abbildung 53: Schichtaufbau beim Flachbilddetektor mit indirekter Bildwandlung [12]**

Mit Blick auf die Transistorschalter-Array werden die Anordnung und ihre Funktion in der nächsten Abbildung verdeutlicht:



**Abbildung 54: Prinzipschaltung der Fotodiodenmatrix [12]**

Jeder Transistor ist verbunden mit einer Fotodiode. Jeweils ein Fotodiode und ein Transistorschalter zusammen ergeben einen Pixel. Eine kleine Kapazität C und ein paralleler geschalteter veränderlicher Fotowiderstand R bilden die Ersatzschaltung für eine Fotodiode. Ohne Lichteinfall ist die Kapazität C bis zur maximalen Vorspannung aufgeladen. Die Fotowiderstand R ist sehr hoch.

## Flachbilddetektor [10]

Rezeptortyp: Amorphous Silicon mit Charge Well Pixel™ Technology

Abmessungen: 46.0 cm x 38.4 cm x 1.5 cm

Pixelmatrix:                   gesamt: 3.027 x 2.560

### 5.2.2 Übertragungseigenschaften

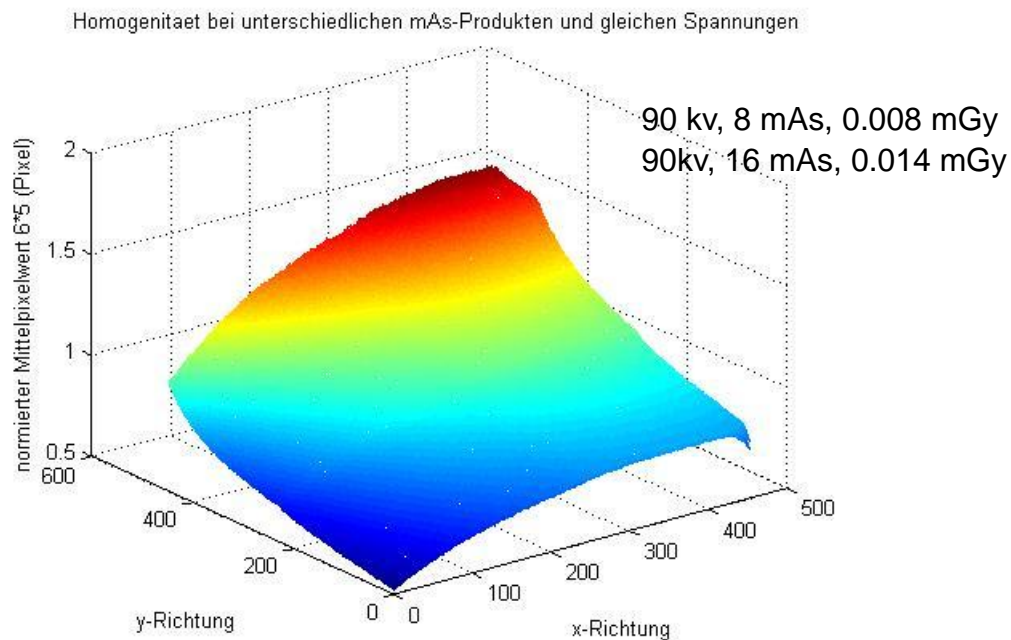
Seite 83 von 125

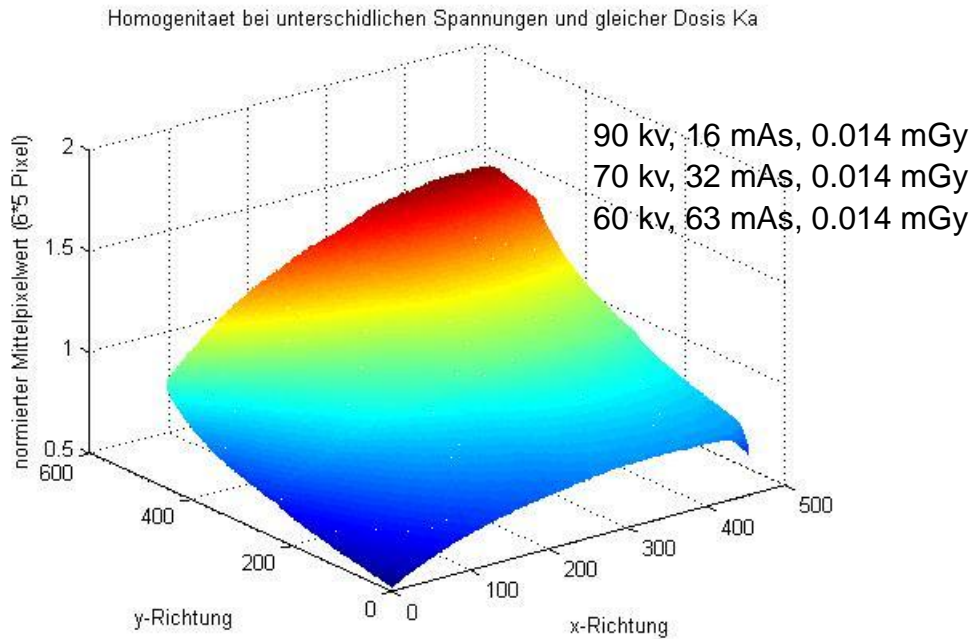
## Homogenität

Um die Homogenität des Flachbilddetektors zu untersuchen wird eine Leerbildaufnahme wie beim Speicherfoliensystem durchgeführt und der örtliche Verlauf der Primärdaten ausgewertet.

Fokus-Film-Abstand	100 cm		
Schwächungskörper	mit 38 mm Al		
Aufnahme 1			
Röhrenspannung:	90 kv		
mAs-Produkt	8 mAs	16 mAs	
Aufnahme 2			
Luftkerma	0,014 mGy	0,014 mGy	0,014 mGy
Röhrenspannung	60 kv	70 kv	90 kv
mAs-Produkt	63 mAs	32 mAs	16 mAs

**Tabelle 9: Versuchsparameter Leerbildaufnahme, (Flachbilddetektor)**

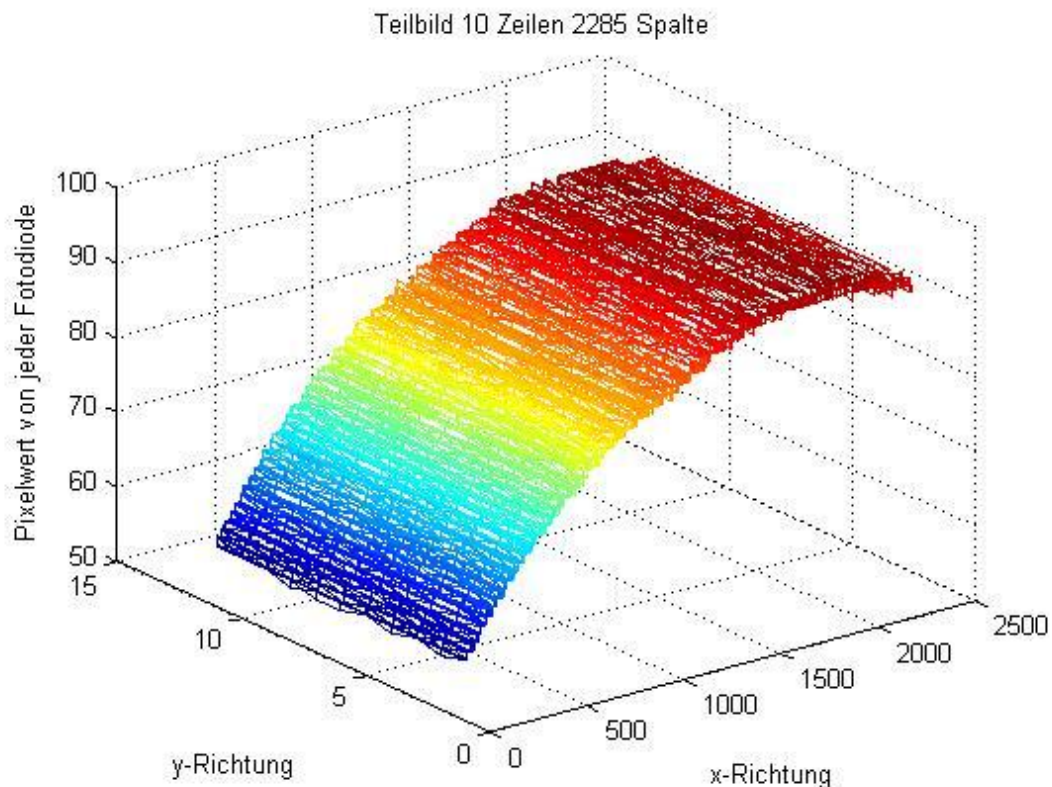




**Abbildung 55: Homogenitätsprüfung (Flachbilddetektor)**

Die Abbildung 55 macht deutlich, dass der Flachbilddetektor keine ideale Homogenität zeigt. Der Mittelpixelwert verändert sich stetig längs der Ortskoordinaten. Aber bei gleicher Spannung und ähnlicher Dosis  $K_a$  stimmen die drei Aufnahme fast überein. Daraus folgt das Fazit: Die Flachbilddetektor besitzt zeigt bei der gewählten Versuchsanordnung keine ideale Homogenität. Die Inhomogenität ist aber weitgehend unabhängig von der Quantenenergie (Spannung) und von der Dosis (mAs). Der größte Unterschied ist 50%. Die Ursache hierfür muss in weiteren experimentellen Untersuchungen geklärt werden. Eine Inhomogenität des primären Röntgenbildwandlers (Leuchtstoff) ist nicht anzunehmen. Hier ist eher der Einfluss des inhomogenen Strahlenfeldes zu vermuten.

Die Fotodiodenmatrix zeigt die pixelweisen Abweichungen wegen der individuellen Wandlereigenschaften (s. Abbildung 56). So könnte für die „Inhomogenität“ des Wandlers auch das Nutzstrahlenfeld wegen des Heel-Effektes verantwortlich sein.



**Abbildung 56: Pixelwerte einzelner Fotodioden eines schmalen Streifens (Flachbilddet.)**

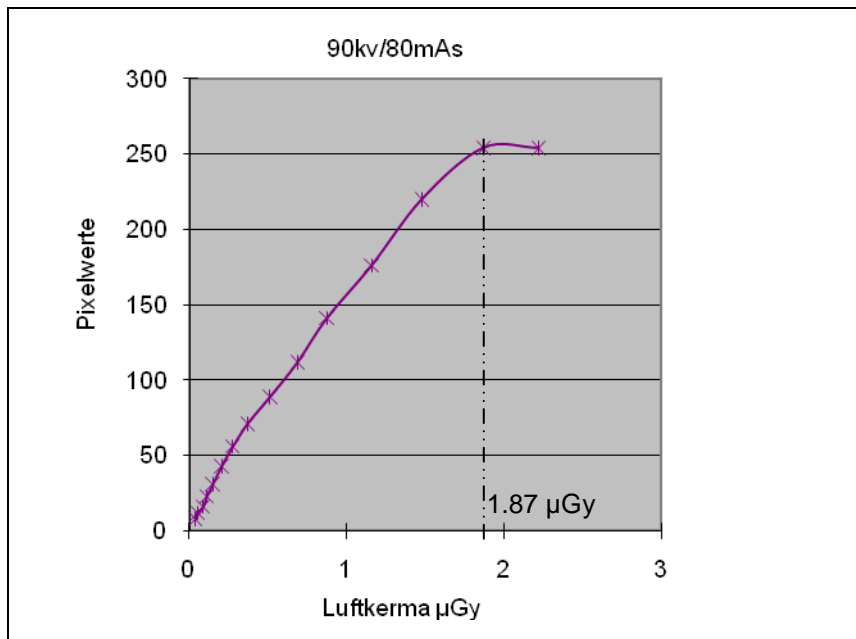
### Statisches Verhalten

Das statische Verhalten wird von einer Aluminiumtrappe mit 14 Stufen getestet.

Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	mit 38 mm Al
Röhrenspannung:	90 kv
mAs-Produkt	80 mAs

**Tabelle 10: Versuchsparameter statisches Verhalten (Flachbilddetektor)**

Zur Auswertung wird der Mittelpixelwert von jeder Stufe abgelesen. Sie werden über dem der Luftkerma  $K_a$  aufgetragen. Das digitale Röntgenbild von dem Flachbilddetektor ist positiv dargestellt.



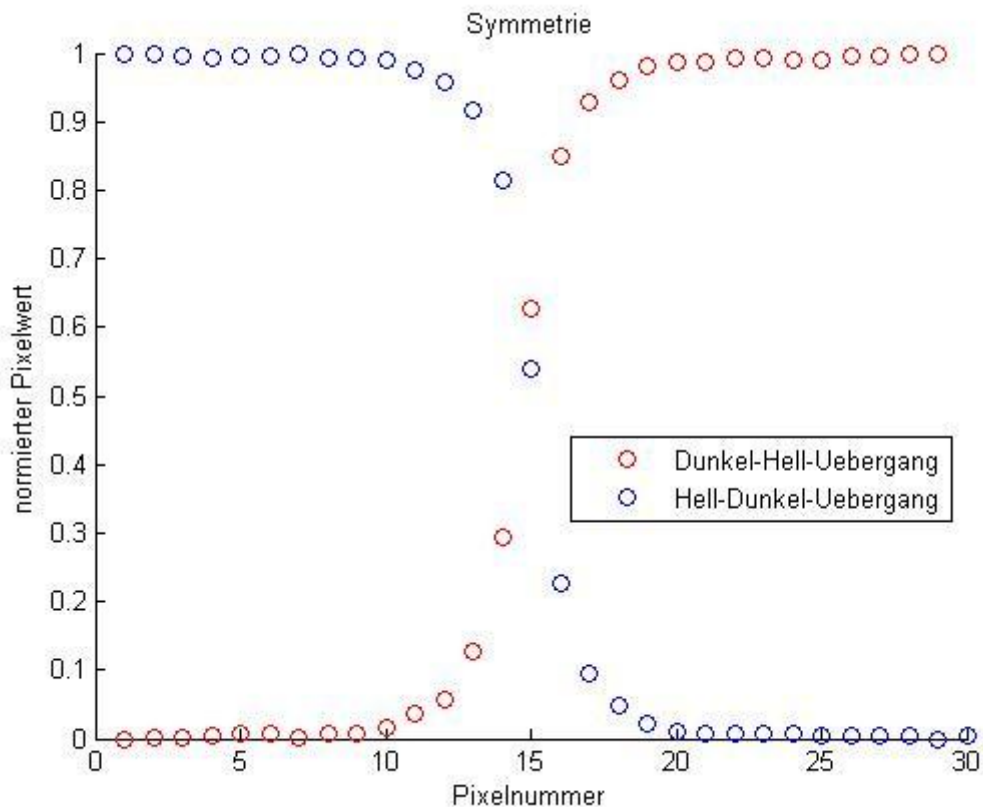
**Abbildung 57: statische Kennlinie (Flachbilddetektor)**

### Invarianzprüfung

Für den Flachbilddetektor wird auch wie beim Speicherfoliensystem die Invarianzprüfung (Symmetrie, Verschiebungsinvarianz und Verdrehungsinvarianz) durchgeführt.

Symmetrie-Prüfen	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	mit 38 mm Al
Röhrenspannung:	60 kv
mAs-Produkt	32 mAs
Phantomhaltung.Mikrometerschraube	16 mm
Aufnahme 1	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal nach rechts
Aufnahme 2	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal nach links

**Tabelle 11: Versuchsparameter Symmetrie (Flachbilddetektor)**



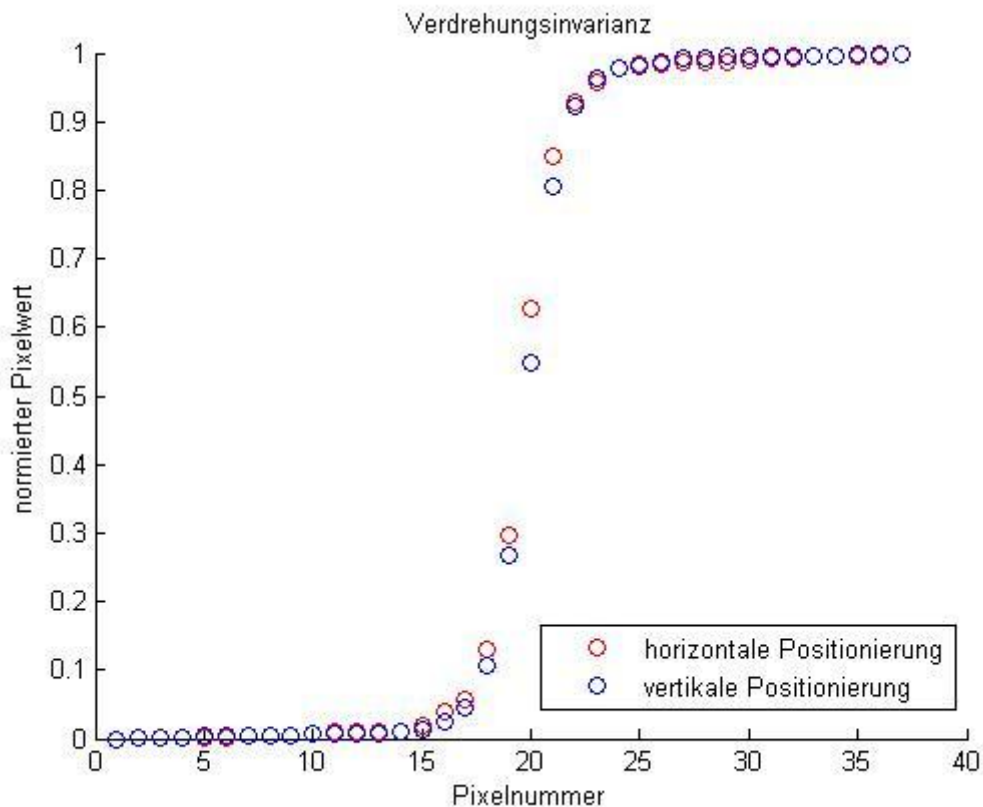
**Abbildung 58: Symmetrieverhalten (Flachbilddetektor)**

Die Kantenkurve des Dunkel-Hell-Übergangs ist wie eine 180°-Spiegelung der Kantenkurve des Hell-Dunkel-Übergangs aussieht. Der Flachbilddetektor ist symmetrisch

Verdrehungsinvarianz-Prüfen	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	mit 38 mm Al
Röhrenspannung:	60 kv
mAs-Produkt	32 mAs
Phantomhaltung, Mikrometerschraube	16 mm
Aufnahme 1	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal
Aufnahme 2	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	vertikal

**Tabelle 12: Versuchsparameter Verdrehungsinvarianz (Flachbilddetektor)**



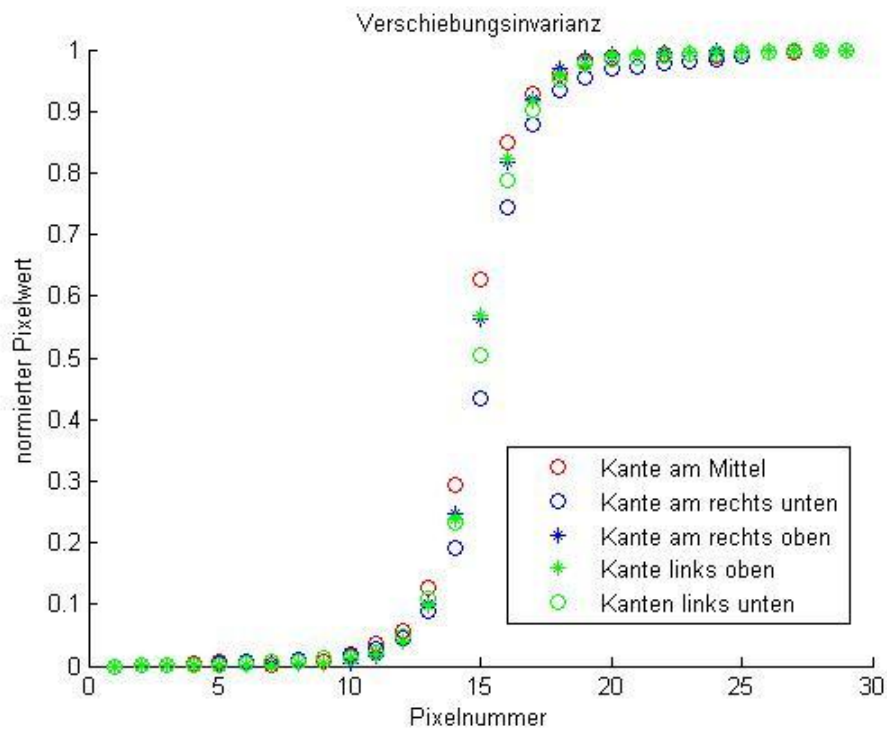


**Abbildung 59: Verdrehungsinvarianz (Flachbilddetektor)**

Die Abbildung 56 zeigt, dass die Verdrehung keinen Einfluss auf das Kantenbild hat. Der Flachbilddetektor verhält sich isotrop.

Verschiebungsinvarianz-Prüfen	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	mit 38 mm Al
Röhrenspannung:	60 kv
mAs-Produkt	10 mAs
Phantomhaltung (Mikrometer-	16 mm
Aufnahme 1	
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal
Aufnahme 2	
Kantenposition	am Rand
Kantenrichtung	horizontal

**Tabelle 13: Versuchsparameter Verschiebungsinvarianz (Flachbilddetektor)**



**Abbildung 60: Verschiebungsinvarianz (Flachbilddetektor)**

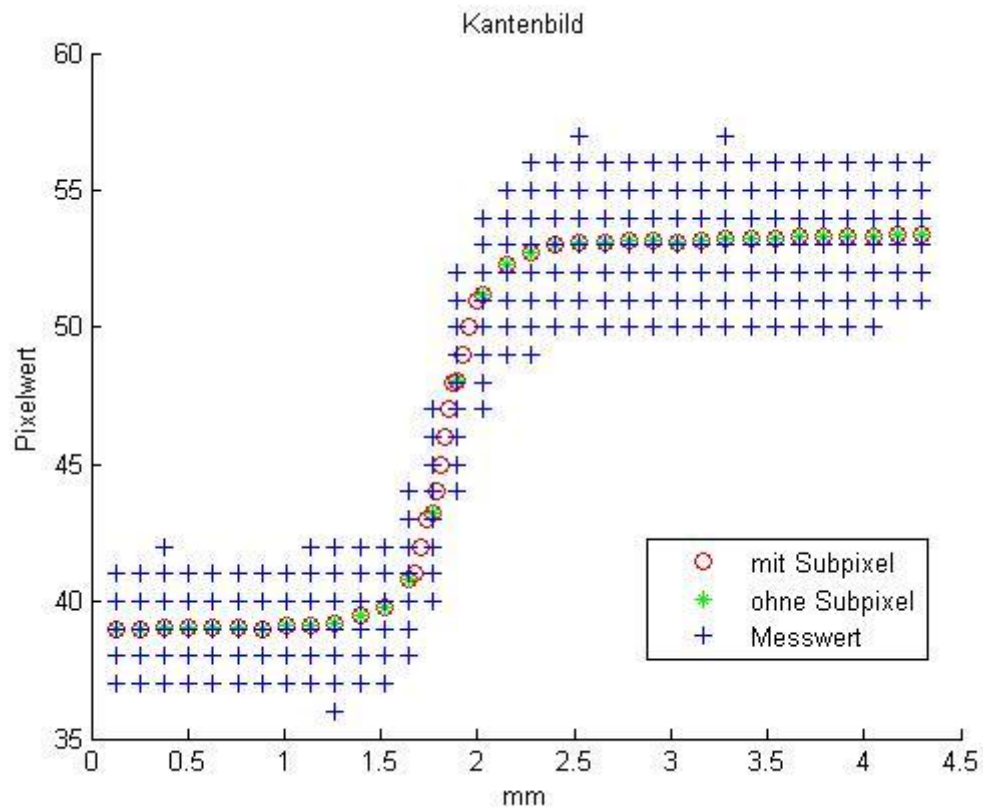
Die Tendenz den vier Kantenkurven stimmt überein. Nur der Pixelwert ist deutlich unterschiedlich. Der Grund dafür ist, dass die ganze Flachbilddetektorfläche nicht homogen ist. Aber das Speicherfoliensystem ist isoplan.

### 5.2.3 Analyse von Kantenbildern

Für die Messung des Kantenbildes wird eine Kante mit  $0.05 \mu\text{m Pb}$  eingesetzt

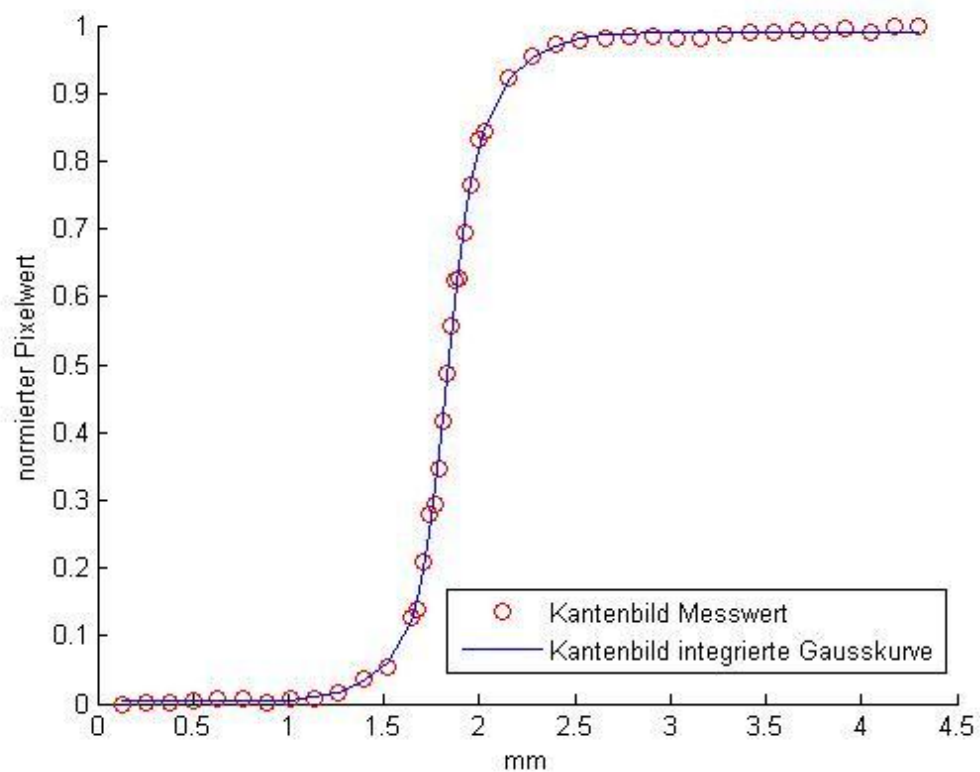
Kantenbild	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	Mit 38 mm Al
Röhrenspannung:	60 kv
Röhrenstrom	32 mAs
Phantomhaltung (Mikrometer-	16 mm
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal

**Tabelle 14: Versuchsparameter Kantenbild (Flachbilddetektor)**



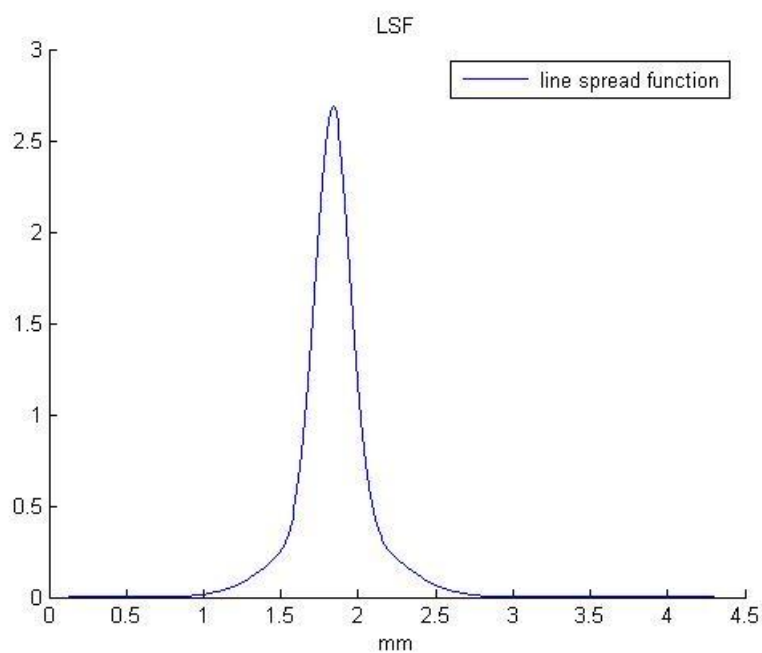
**Abbildung 61: Kantenbild,(Flachbilddetektor)**

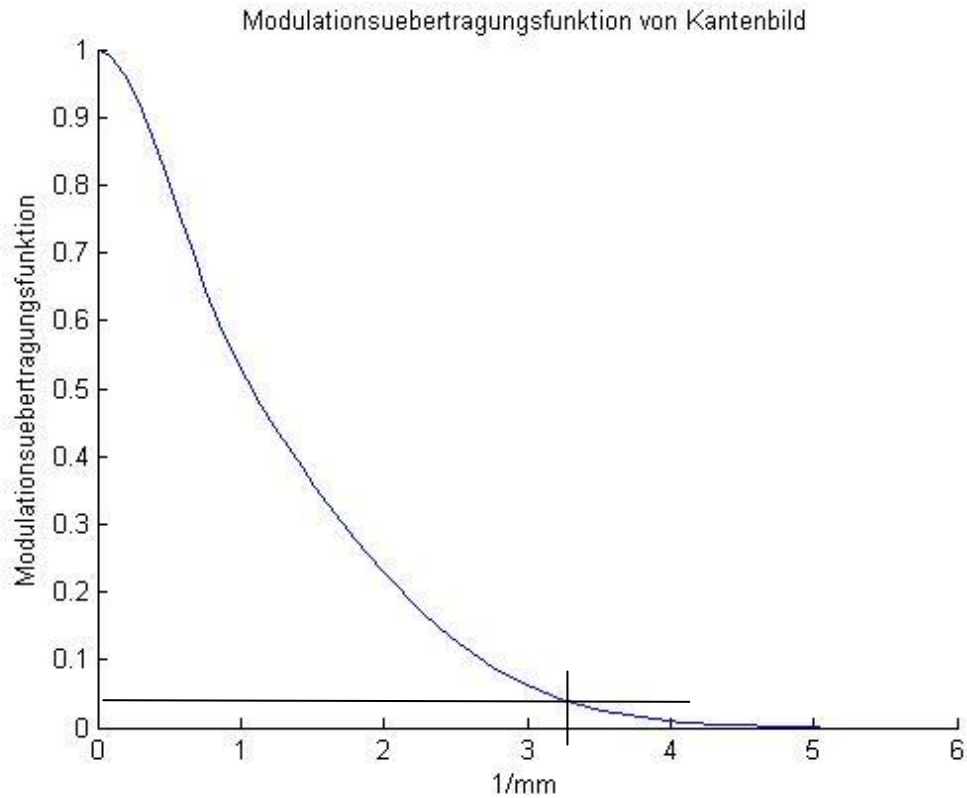
Das Kantenbild wird auf Eins normiert und mit dem mathematischen Model analysiert.



**Abbildung 62: Kantenbild und Anpassung des integrierte Gaußmodell (Flachbilddetektor)**

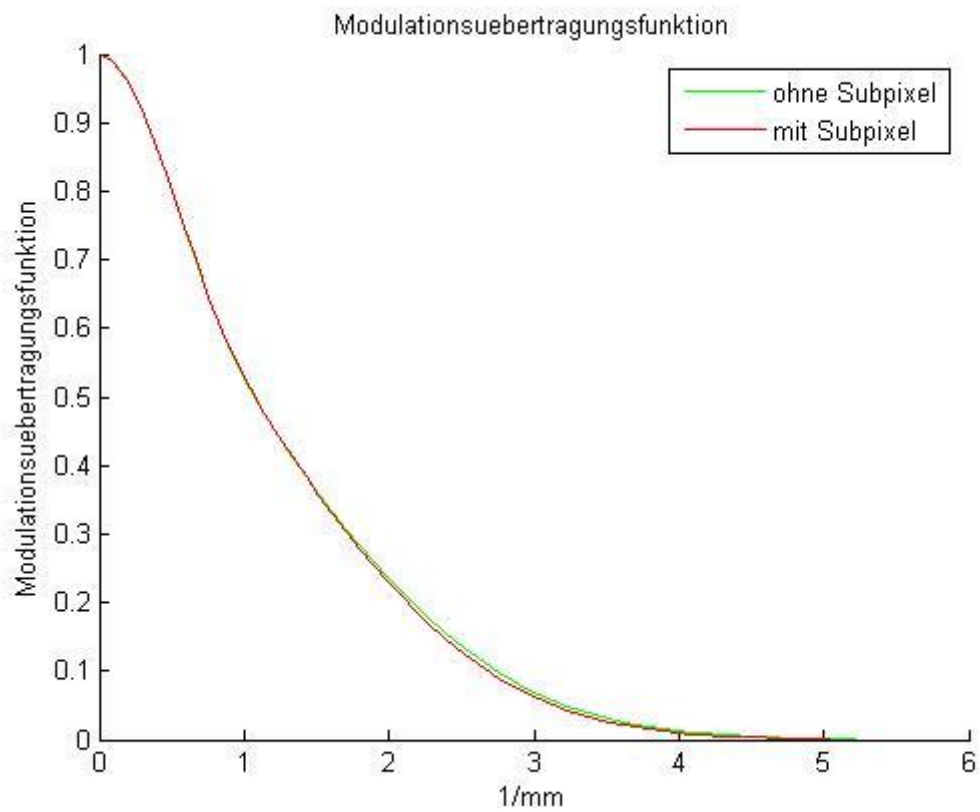
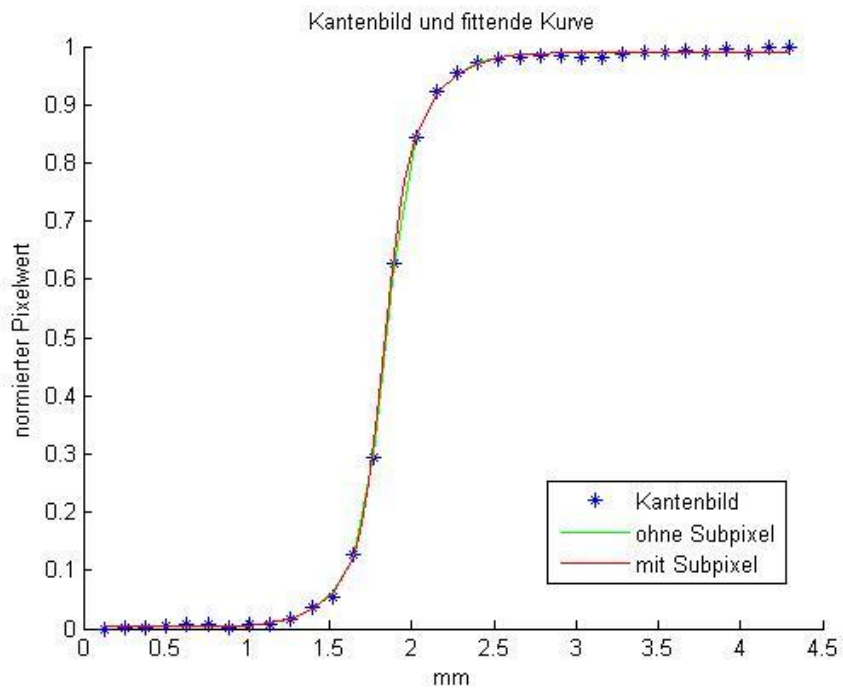
Das gefittete Kantenbild wird zuerst Differential berechnet und danach Fourier transformiert. Daraus ergibt sich die optische Übertragungsfunktion. Der absolute Betrag ist die Modulationsübertragungsfunktion





**Abbildung 63: oben: LSF unten: Modulationsübertragungsfunktion (Flachbilddetektor)**

Die Auflösung beträgt ungefähr bis  $4 \text{ mm}^{-1}$ . Bei  $3.3 \text{ mm}^{-1}$  ist die Modulationsübertragungsfunktion auf 0.04 gesunken. Wie beim Speicherfoliensystem führen die Messwerte mit den Subpixelwerten zu einer besseren Anpassung an die mathematische Modellfunktion.



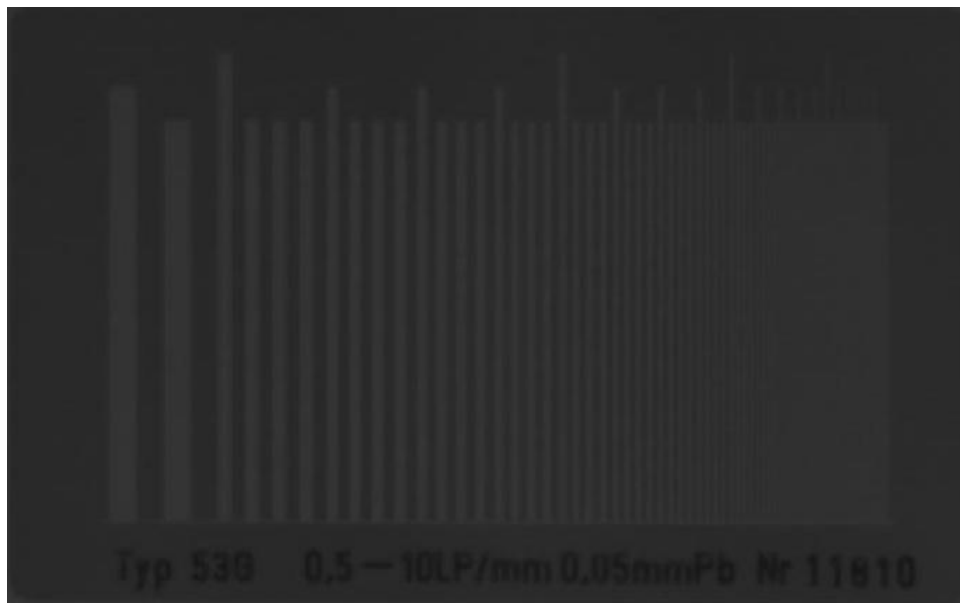
**Abbildung 64: Vergleich der Modulationsübertragungsfunktion ohne und mit Subpixel (Flachbilddetektor)**

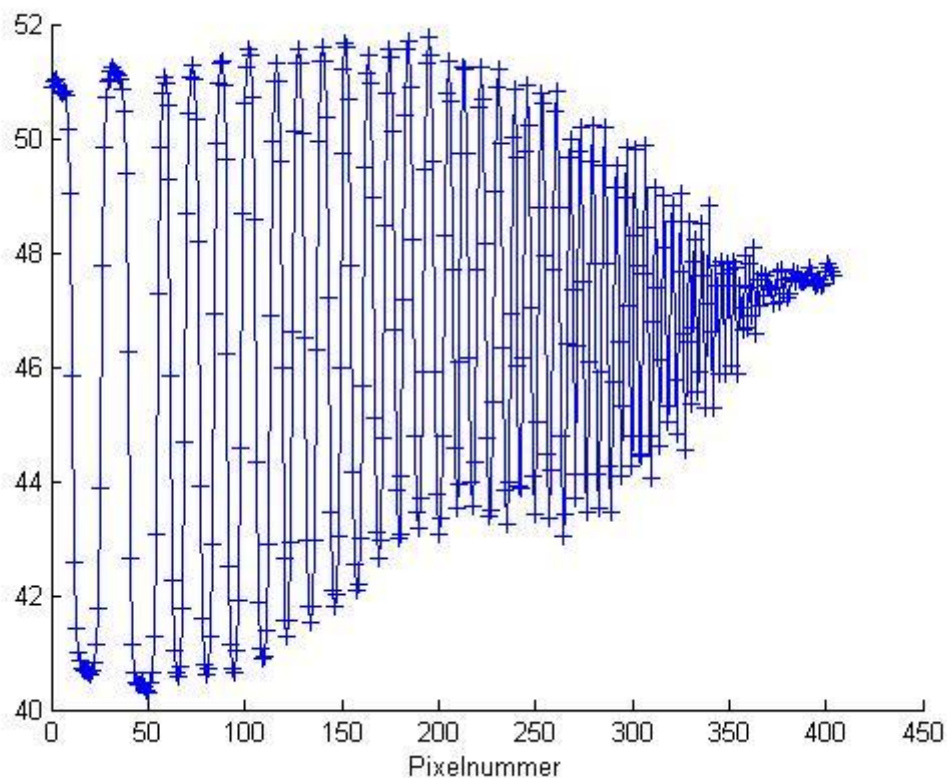
## 5.2.4 Analyse von Rasteraufnahmen

Aufgrund der Definition der Modulationsübertragungsfunktion (2.5.2) bietet sich eine weitere Möglichkeit an, die Modulationsübertragungsfunktion zu bestimmen. Der Bleistrichraster wird als Phantom verwendet.

Linienraster	
Fokus-Film-Abstand	100 cm
Schwächungskörper	mit 38 mm Al
Röhrenspannung:	60 kv
mAs-Produkt	32 mAs
Typ der Linienraster	Gruppentestraster Typ 538
Kantenposition	Mitte
Kantenrichtung	horizontal

**Tabelle 15: Versuchsparameter Linienraster (Flachbilddetektor)**

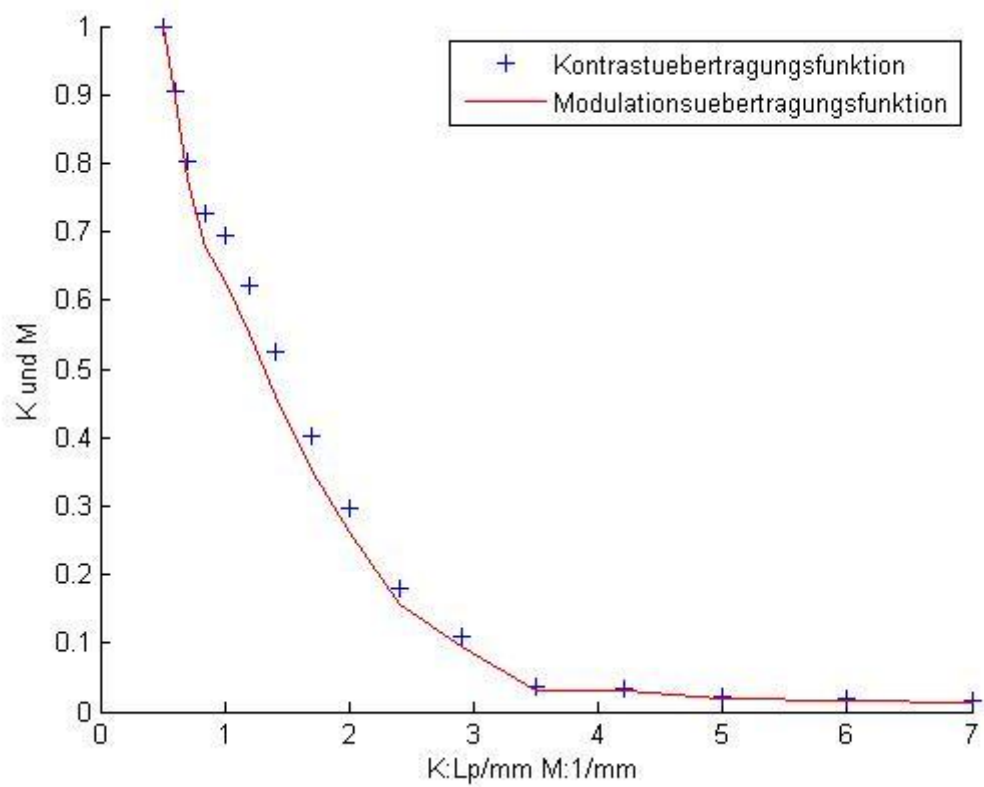




**Abbildung 65: oben: Gruppentestraster Typ 538  
unten: dazugehörige mittlere Pixelwerte (Flachbilddetektor)**

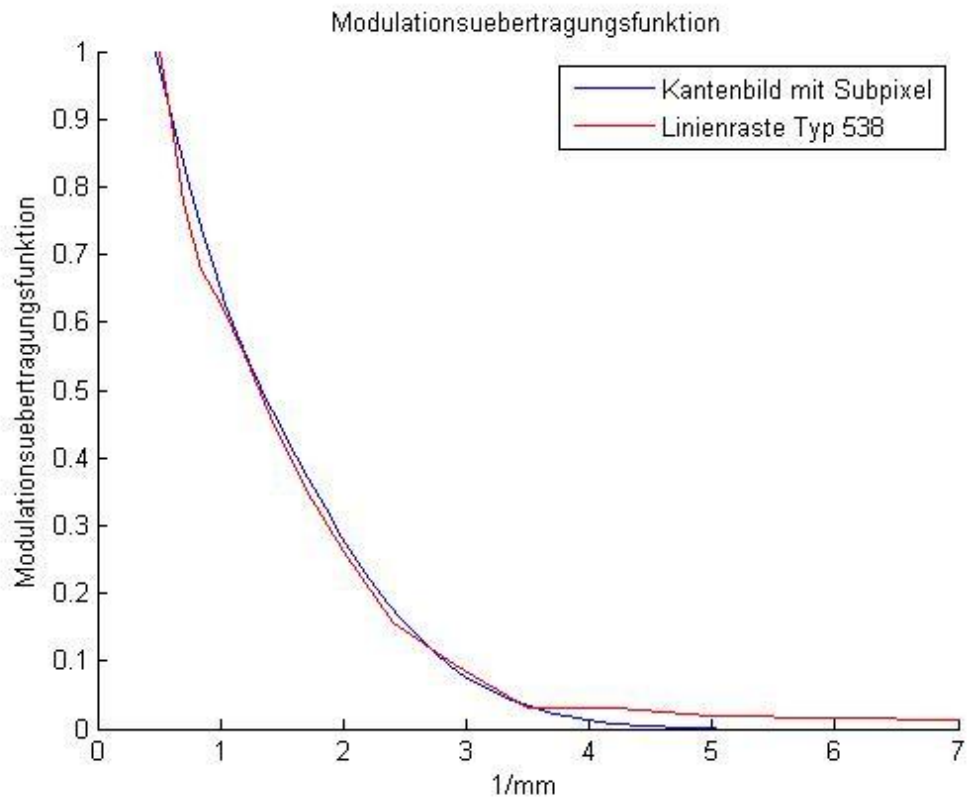
Nach der Röntgenaufnahme wird der Bleistrichraster als digitalisierte Bilddaten dargestellt. Es zeigt die hellen und dunklen Streifen. Wegen der Inhomogenität und der Streustrahleneinflüsse ist der Mittelwert vom Gruppentestraster nicht konstant. Die Kontrastübertragungsfaktoren werden berechnet. Nach der Umrechnung mit der Altar-Korrekturformel ergibt sich die Modulationsübertragungsfunktion. Wegen mangelnder Messwerte liegen die Kurve der Modulationsfunktion und Kontrastübertragungsfunktion ab  $3 \text{ mm}^{-1}$  übereinander.





**Abbildung 66: Kontrast- und Modulationsübertragungsfunktion (Flachbilddetektor)**

### 5.2.5 Vergleich der Modulationsübertragungsfunktionen



**Abbildung 67: Vergleich der Modulationsübertragungsfunktionen vom Kantenbild und dem Linienraster Typ 538 (Flachbilddetektor)**

Die beiden Kurven vom Flachbilddetektor zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die vom Speicherfoliensystem. Wegen der ungenauen Umrechnung von der Altar-Korrekturformel wird die Modulationsübertragungsfunktion aus dem Gruppenraster bei hohen Ortsfrequenzen fehlerhaft. Sie geht nicht auf Null.

## 5.3 Physikalische Interpretation der Kennfunktionen

Die Röntgenquanten werden im Leuchtstoff in eine Leuchtdichteverteilung umgewandelt. Die Leuchtdichteverteilung hat eine ähnliche Forme wie die Gaußfunktion. Die Gaußverteilung oder integrierte Gaußfunktion wird als mathematisches Modell ausgewählt.

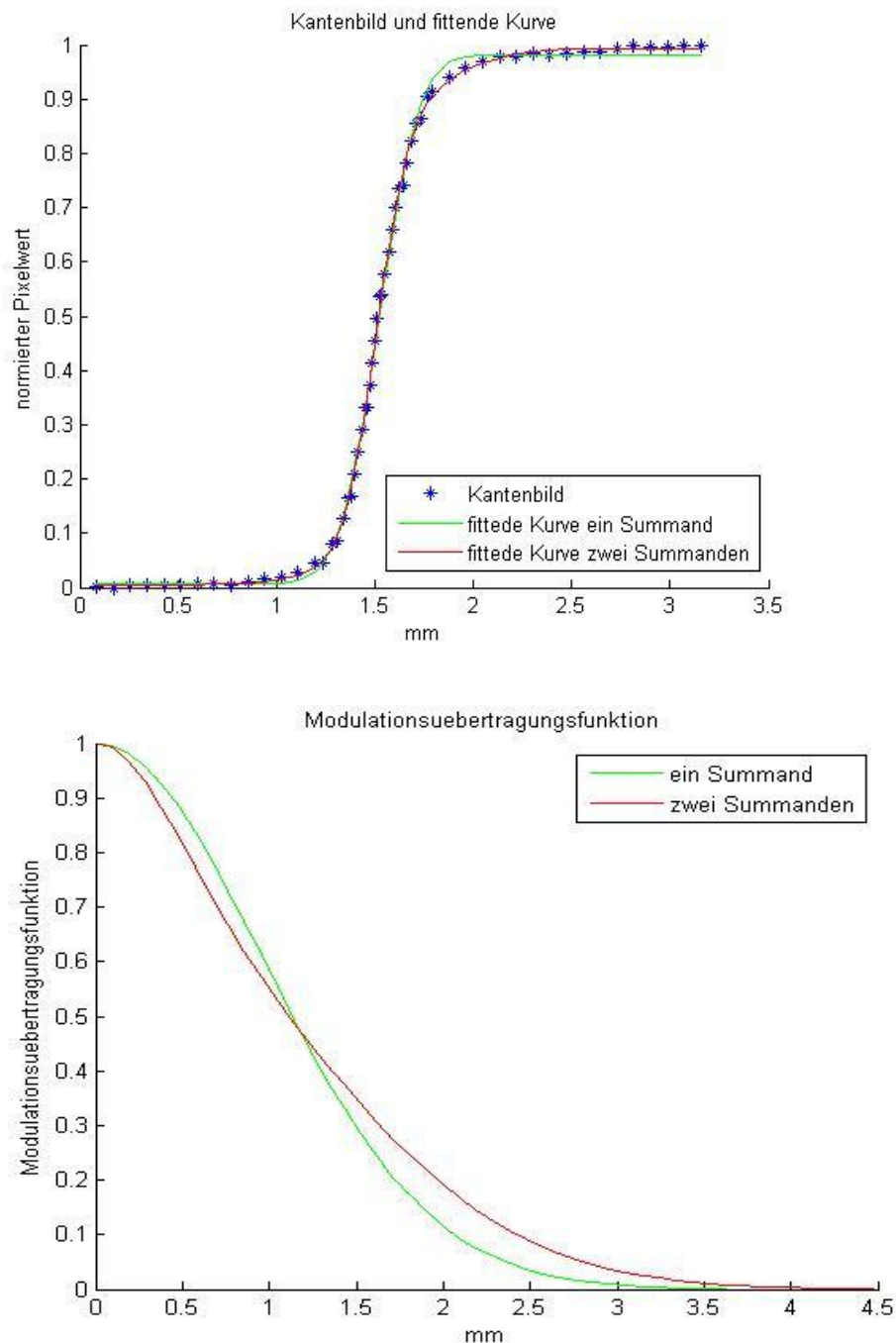
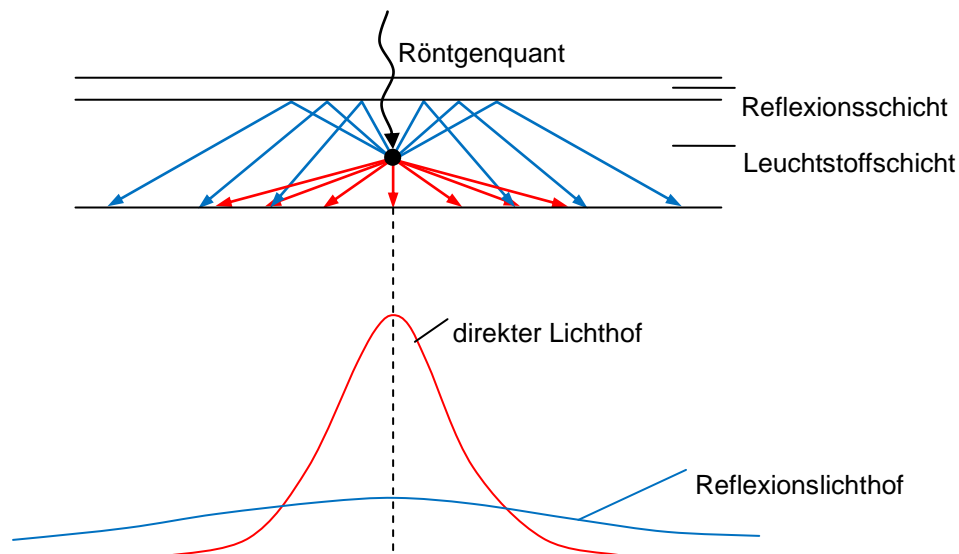


Abbildung 68: Modulationsübertragungsfunktion (Flachbilddetektor)

Die bessere Anpassung der Modellfunktion mit zwei Summenden zeigt, dass zwei physikalische Prozesse die örtliche Verschmierung im Bild verursachen: Es ist die Emission der Lichtquanten in den unteren Halbraum, die direkt die zweite Wandlerstufe treffen (direkter Lichthof) und die von der Reflexionsschicht zurückreflektierten Lichtquanten (Reflexionslichthof). Es lässt sich als Summe zweier Punktbilder interpretieren.



**Abbildung 69: Leuchtdichteverteilung**

## 6 Zusammenfassende Bewertung

In dieser Arbeit wird das Übertragungsverhalten vom Speicherfoliensystem und vom Flachbilddetektor experimentell bestimmt.

Indirekte digitale Bildwandler besitzen eine analoge Wandlerstufe und eine digitale Wandlerstufe. Es gibt keine Möglichkeit, das Übertragungsverhalten der Wandlerstufen separat zu messen. Das Übertragungsverhalten der digitalen Wandlerstufe muss idealisiert oder berechnet werden.

Die statische Kennlinie des Speicherfoliensystems und Flachbilddetektors zeigt einen linearen Verlauf. Die beiden Bildwandler sind richtungsinvariant, isotrop und isoplan. Aber die beiden digitalen Bildwandler besitzen keine ideale Homogenität. Die Inhomogenität ist weitgehend unabhängig von der Quantenenergie (Spannung) und von der Dosis (mAs). Eine Ursache der Inhomogenität zumindest der Speicherfolie liegt im Wandler. Ein Einfluss des (inhomogenen) Strahlenfeldes muss noch experimentell bewertet werden.

Die Modulationsübertragungsfunktion wird mit zwei Messverfahren ermittelt. Im Ortsbereich wird das Kantenverfahren durchgeführt und das Rasterverfahren im Ortsfrequenzbereich. Zur Berechnung der Modulationsübertragungsfunktion wird die Gaußverteilung oder integrierte Gaußfunktion als mathematisches Modell ausgewählt. Nach der Umwandlung der Röntgenquanten entsteht die Leuchtdichteverteilung. Die Leuchtdichteverteilung hat eine ähnliche Form wie die Gaußfunktion. Die vorhandenen Testraster werden mit einer Fotokamera aufgenommen und in unterschiedliche Gruppen eingeteilt. Zur Ermittlung der Gewichtsfunktion wird das Kantenphantom benutzt. Durch die Ergänzung der Messwerte im Subpixelbereich kann die mathematische Modellfunktion der Kantenbildkurve genauer angepasst werden. Daraus wird durch Differentiation die Gewichtsfunktion berechnet. Für eine eher visuelle Bewertung des örtlichen Auflösungsvermögens sind Gruppentestraster ge-

eignet. Die eigenen Messungen haben ergeben, dass wegen mangelnder Messwerte die daraus berechnete Modulationsübertragungsfunktion im hohen Ortsfrequenzbereich fehlerhaft ist. Das Messverfahren mit dem Kantenbild ist besser geeignet für die Berechnung der Gewichts- und Modulationsübertragungsfunktion.

## 7 Hinweise zur weiteren Themenbearbeitung

In dieser Diplomarbeit werden die Primärdaten der beiden Bildwandler genutzt. Die Firma Kodak bietet die Möglichkeit, die Rohdatenbilder direkt nach der Röntgenbildaufnahme zu nutzen. Dies funktioniert beim Speicherfoliensystem. Aber beim Flachbilddetektor ist es nicht möglich, die Rohdaten in einem normalen Bildformat zu analysieren. Alternativ werden die Rohdatenbilder mit Hilfe der Software „ezDicom“ geöffnet und weiter bearbeitet. Bisher gelingt es nicht, diese Dateien umzuwandeln in ein anderes Bilddatenformat. Die Rohdatenbilder vom Flachbilddetektor können nicht direkt gezeigt werden. Hier ist künftig eine einfache Umwandlung der Bilddaten zu realisieren, damit dieselben Möglichkeiten wie bei der Speicherfolie nutzbar werden.

Die statische Kennlinie des Speicherfoliensystems ist in Abbildung 38 gezeigt. Die Kennlinie ist bis zum Sättigungsbereich dargestellt. Bei dem niedrigen Luftkerma wird die Trendlinie hinzugefügt. Die statische Kennlinie muss im niedrigen Luftkermabereich noch ergänzt werden. Hierzu sind geeignete Messbedingungen zu entwerfen und zu realisieren.

Durch die Analyse des Rohdatenbildes des Speicherfoliensystems und des Flachbilddetektors ergibt sich das Resultat, dass beide digitale Bildwandler keine ideale Homogenität besitzen. Beim Flachbilddetektor ist die Abweichung bis zu 50%. Die Ursache hierfür muss in weiteren experimentellen Untersuchungen geklärt werden. Hier ist insbesondere messtechnisch der Einfluss des Bildwandlers und des Strahlenfeldes zu differenzieren. Zusätzlich sind die Inhomogenitäten zu quantifizieren, um sie effektiv korrigieren zu können.

Nach der Röntgenaufnahme wird der Bleistrichraster als digitalisiertes Bild-datenarray dargestellt (Abbildung 50 und Abbildung 65). Wegen der Inhomogenität und des Streustrahleneinflusses ist der Mittelwert, um den die Amplituden der Gruppentestraster schwanken, nicht konstant. Es soll eine

mathematische Korrektur entwickelt werden, um diesen schwankenden Mittelwert zu korrigieren. Damit bleibt der Mittelwert konstant.

Zur Berechnung der Modulationsübertragungsfunktion wird die Kennfunktion von zwei Summanden des mathematischen Modells analysiert. Es bietet auch die Möglichkeit, die Übertragungsschritte einzeln zu untersuchen.

Für die realen, nichtidealen Übertragungseigenschaften des Laserscanners und der Fotodiodenmatrix ist eine rechnerische Abschätzung vorzunehmen und zu klären, inwieweit die bisherigen Ergebnisse zum Übertragungsverhalten zu korrigieren sind.

Zur Übernahme der beiden digitalen Röntgenbildwandler in das studentische Praktikum ist eine Versuchsanleitung und ein Musterprotokoll zu entwerfen und messtechnisch zu überprüfen.

Abschließend sind Möglichkeiten zu prüfen, ob und wie die digitalen Röntgenbildwandler zu einer halbobjektiven oder objektiven Bildgütebewertung, z.B. mit Kontrast - Detail - Diagrammen und ROC - Kurven unter Berücksichtigung einer subjektiven Bildauswertung durch den Menschen genutzt werden können.



## Abkürzungsverzeichnis

KÜF	Kontrastübertragungsfaktor
K	Kontrastübertragungsfunktion
OTF	optische Übertragungsfunktion
M	Modulationsübertragungsfunktion
PSF	Punktbildfunktion
LSF	Linienbildfunktion
ESF	Kantenbildfunktion
Lp	Linienpaar
s	Ortssequenz
f	Ortsfrequenz
PoC	Point-of-Care
SEV	Sekundärelektronenvervielfacher
FFA	Fokus-Film-Abstand
FOA	Fokus-Objekt-Abstand

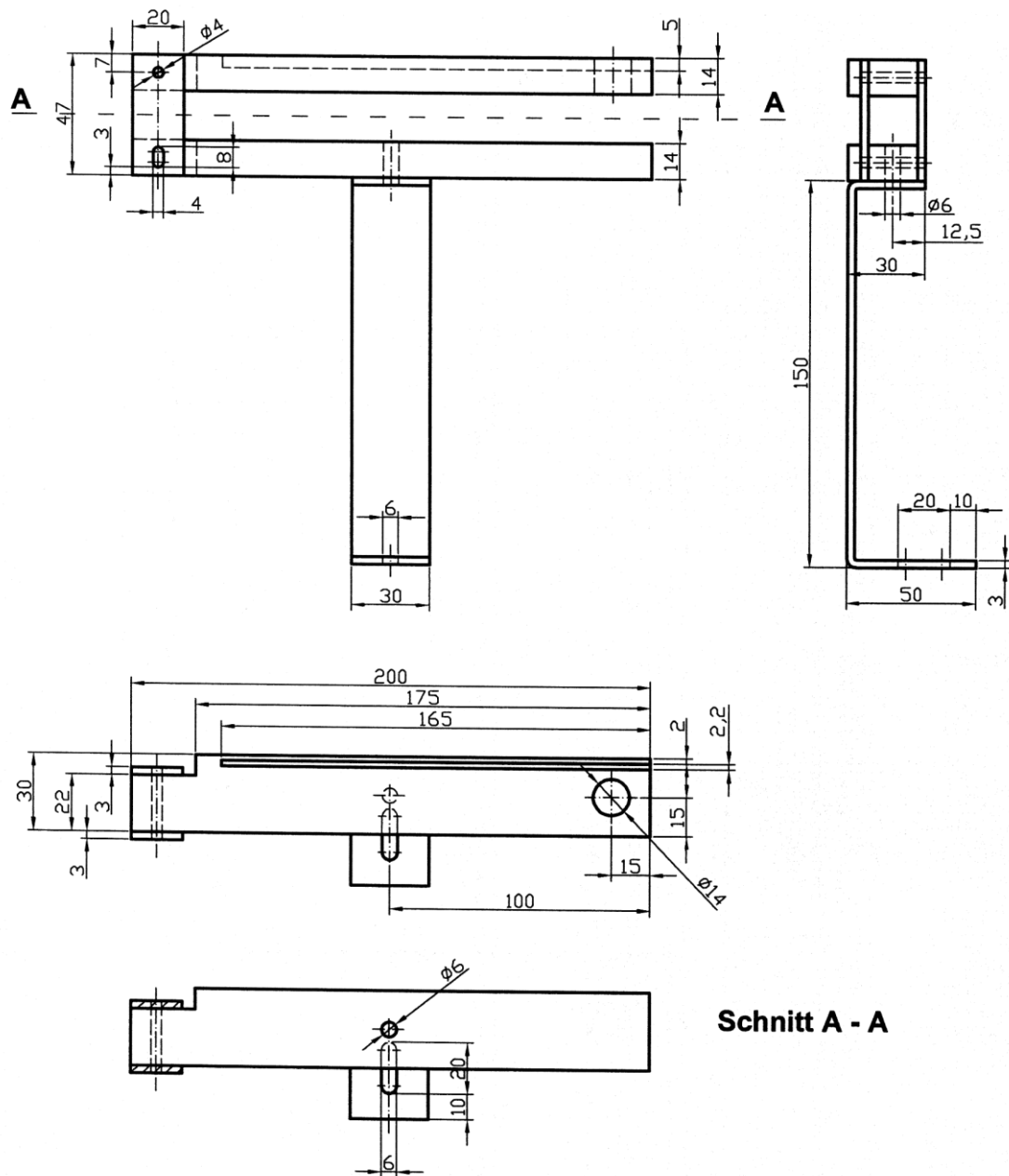
# Literaturverzeichnis

1. DIN 6814 T.1 ff: Begriffe und Benennungen in der radiologischen Technik  
Berlin: Beuth Verlag 1980 ff
2. Keller, A.: Bildgebende Systeme in der Medizin (Vorlesungen)  
Ilmenau: Technische Universität 2008.
3. Grundlagen der Strahlenphysik und radiologischen Technik  
Hrsg.: Angerstein, W. u.a.  
5., völlig neu bearb. u. erw. Aufl.  
Berlin: Hoffmann Verlag 2005. 512 S.
4. Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik  
Hrsg.: Morneburg, H.  
3., wesentl. überarb. u. erw. Aufl.  
München: Publicis-MCD-Verlag 1995. 729 S.
5. <http://www.funk-x-ray-pattern.com/deutsch/ind1.htm>
6. Girod, B.; Rabenstein, R.; Stenger, A.: Einführung in die Systemtheorie:  
Signale und Systeme in der Elektrotechnik und Informationstechnik  
4., durchgesehene u. aktualis. Aufl.  
Wiesbaden: Teubner Verlag 2007. 433 S.
7. Angerstein, W.; Stargard, A.:  
Über die Bildgüte in der Radiologie  
III. Teil: Objektive Bildgütemaße  
Röntgenpraxis 21 (1968) H.1, S.1-15  
IV. Teil: Die MÜF: Eigenschaften und Messmethoden  
Röntgenpraxis 21 (1968) H.2, S.41-49
8. Haykin, S.; van Veen, B.: Signals and Systems  
2nd ed.  
Hoboken, NY: Wiley 2005. 802 S.

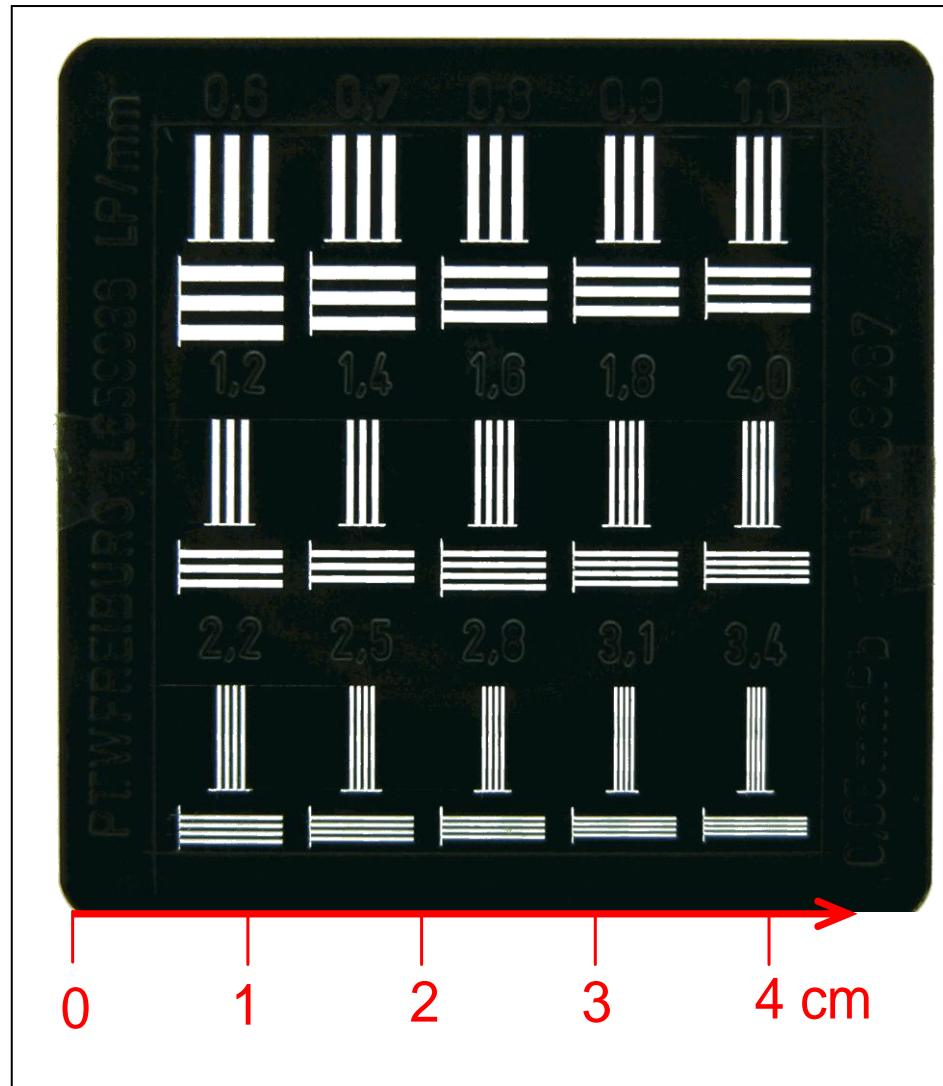
9. Datenblatt Kodak Point-of-Care-CR360
10. Datenblatt PaxScan 4336R
11. Taschenbuch der Mathematik  
Hrsg.: Bronstein, K.; Semendjajew, A.; Musiol, G.; Mühlig, H.  
7., vollst. überarb. u. erg. Aufl.  
Frankfurt a. M.: Harry Deutsch Verlag 2008. 1221 S.
12. Schwab, A.: Digitale Röntgenbildempfangssystem auf Basis indirekter  
Bildwandlung (Hauptseminararbeit)  
Ilmenau: Technische Universität 2009. 12 S.
13. Scholz, N.: Experimentelles Röntgenbilderzeugungssystem mit digitaler  
Schlitzblendentechnik (Diplomarbeit)  
Ilmenau: Technische Universität 2004. 57 S.
14. Röntgendiagnostikeinrichtung: Aufbau, Funktion und Eigenschaften von  
Generator, Strahler und Film-Folien-Kassette (Praktikumsanleitung)  
Ilmenau: Technische Universität 2008. 34 S.
15. Imaging Systems for Medical Diagnostics  
Ed.: Oppelt, A.  
Erlangen: Publicis 2005. 996 S.

# Anlagen

Phantomhalterung (aus 14.)

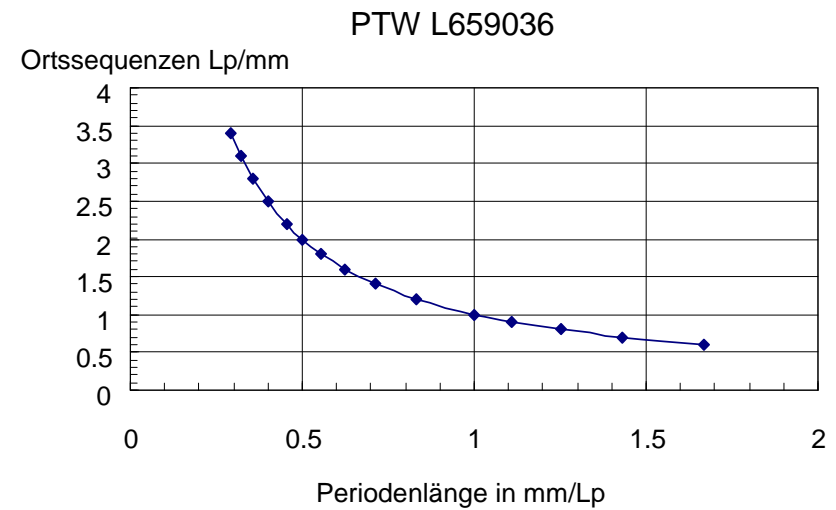


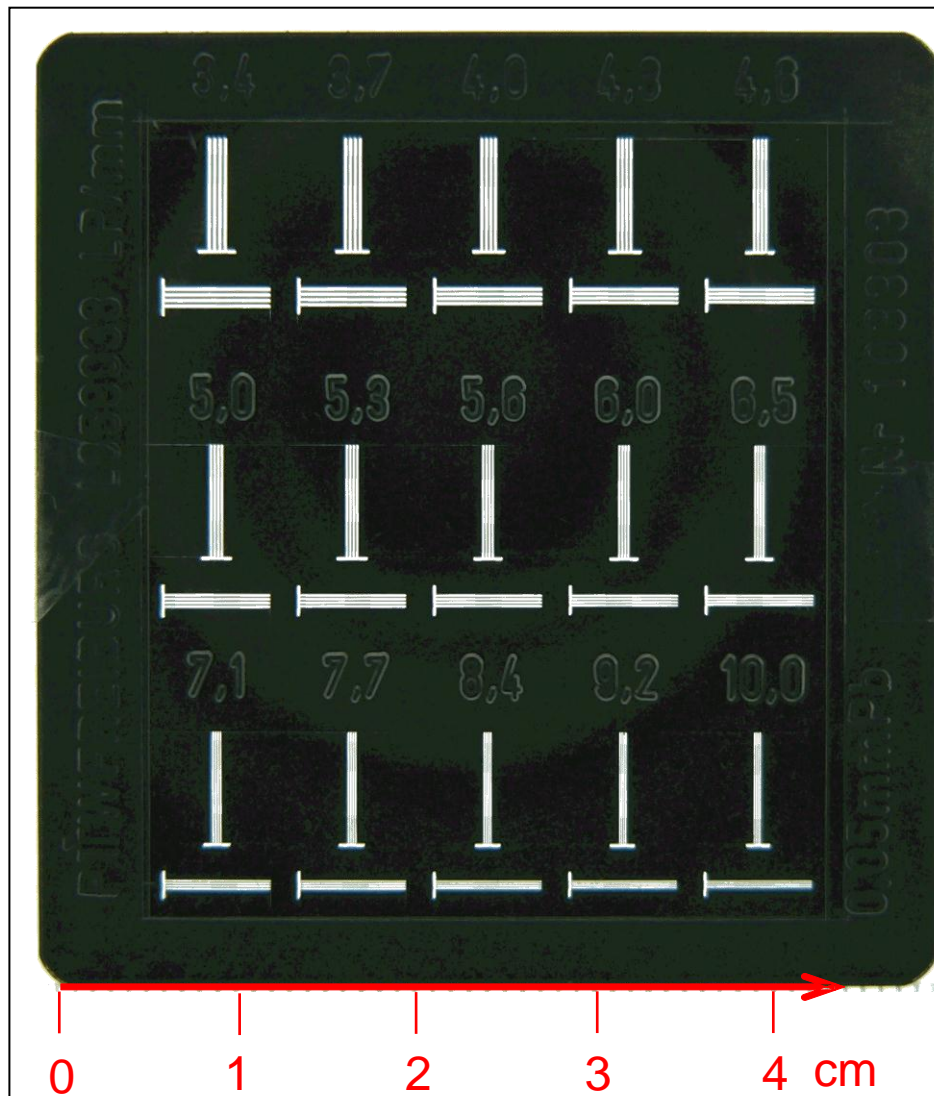
## Testraster



Testart: Gruppentest, zwei Richtungen 90°  
 Nummer: PTW L659036 (Typ 41 Funk)  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Anzahl der Gruppen: 2·15  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.6...3.4  
 Werte (von oben links nach unten rechts) in Lp/mm

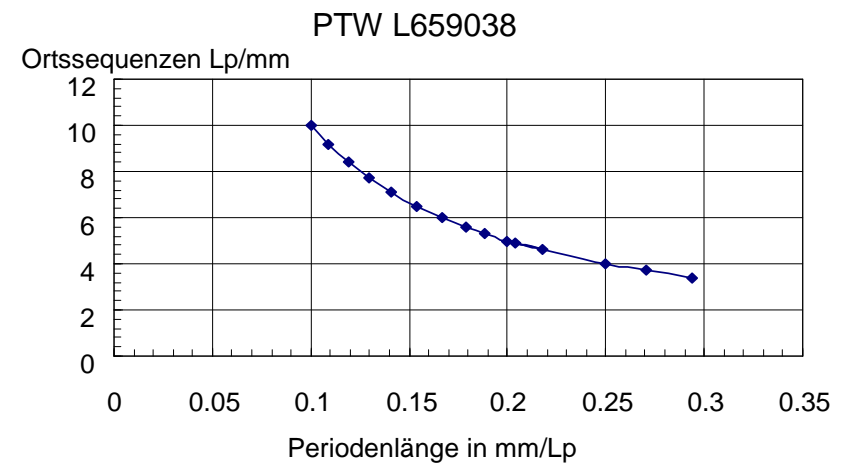
0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
2.2	2.5	2.8	3.1	3.4

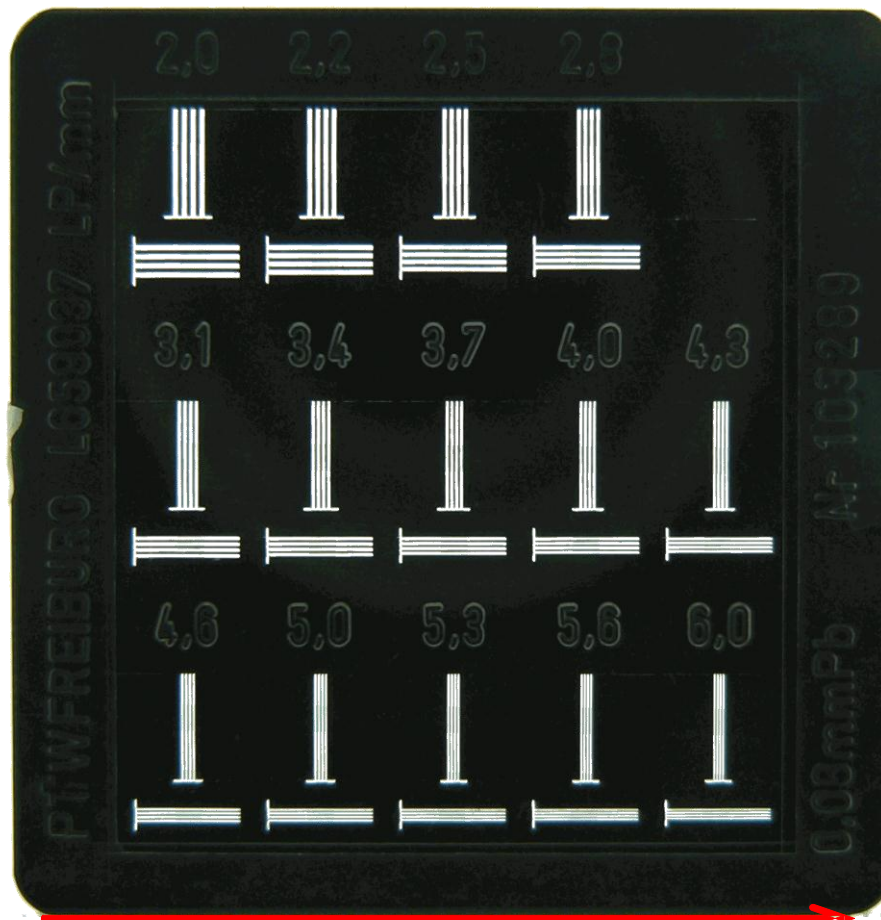




Testart: Gruppentest, zwei Richtungen 90°  
 Nummer: PTW L659038 (Typ 43 Funk)  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Anzahl der Gruppen: 2\*15  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 3.4...10.0  
 Werte (von oben links nach unten rechts) in Lp/mm

3.4	3.7	4	4.9	4.6
5	5.3	5.6	6	6.5
7.1	7.7	8.4	9.2	10





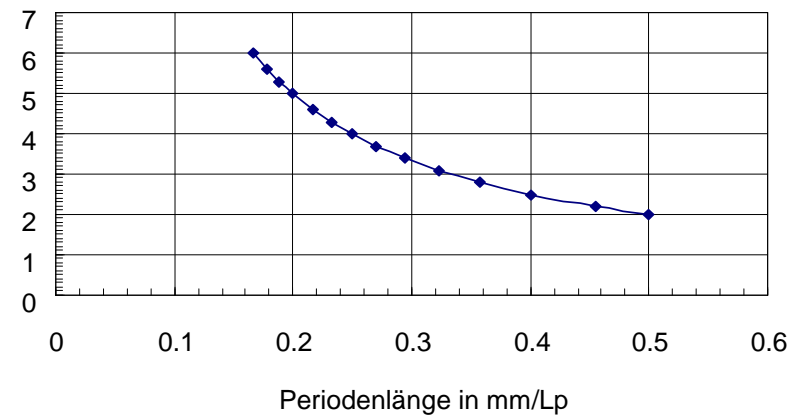
0 1 2 3 4 cm

Testart: Gruppentest, zwei Richtungen 90°  
 Nummer: PTW L659037 (Typ 42 Funk)  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Anzahl der Gruppen: 2.15  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 2.0...6.0  
 Werte (von oben links nach unten rechts) in Lp/mm

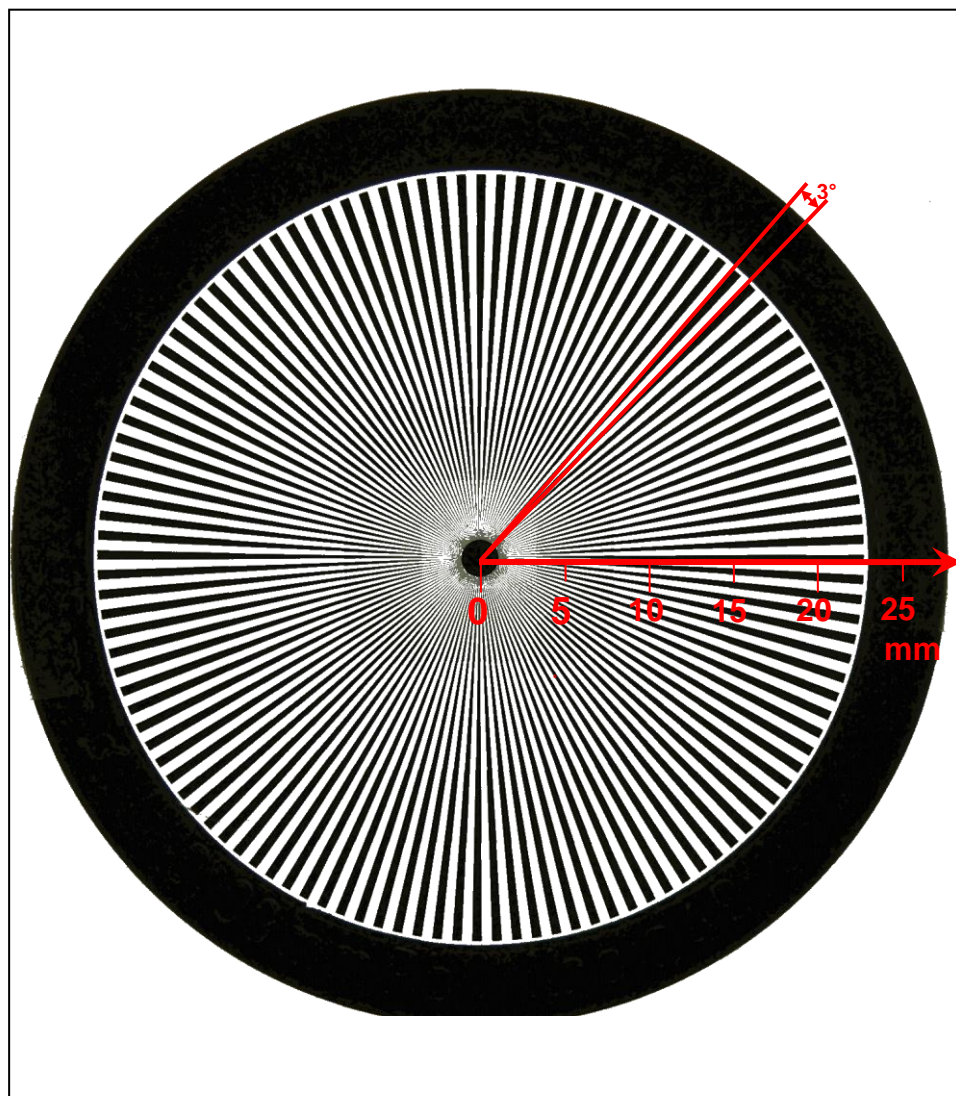
2	2.2	2.5	2.8	
3.1	3.4	3.7	4	4.3
4.6	5	5.3	5.6	6

PTW L659037

Ortssequenzen Lp/mm

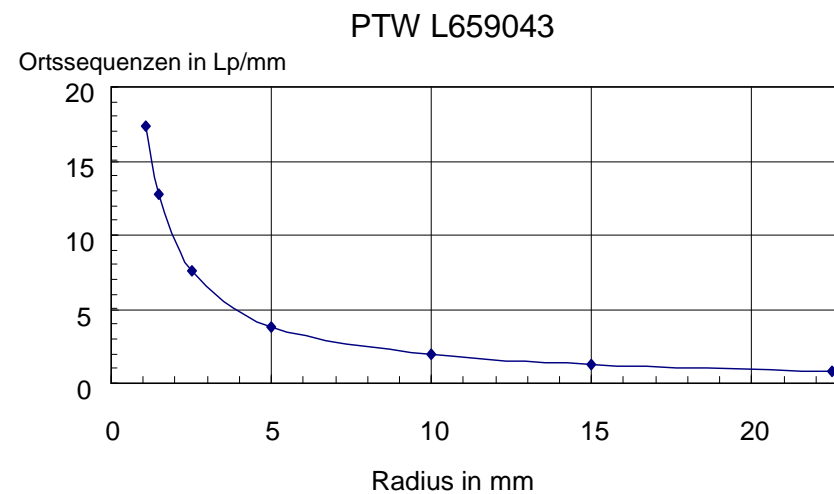




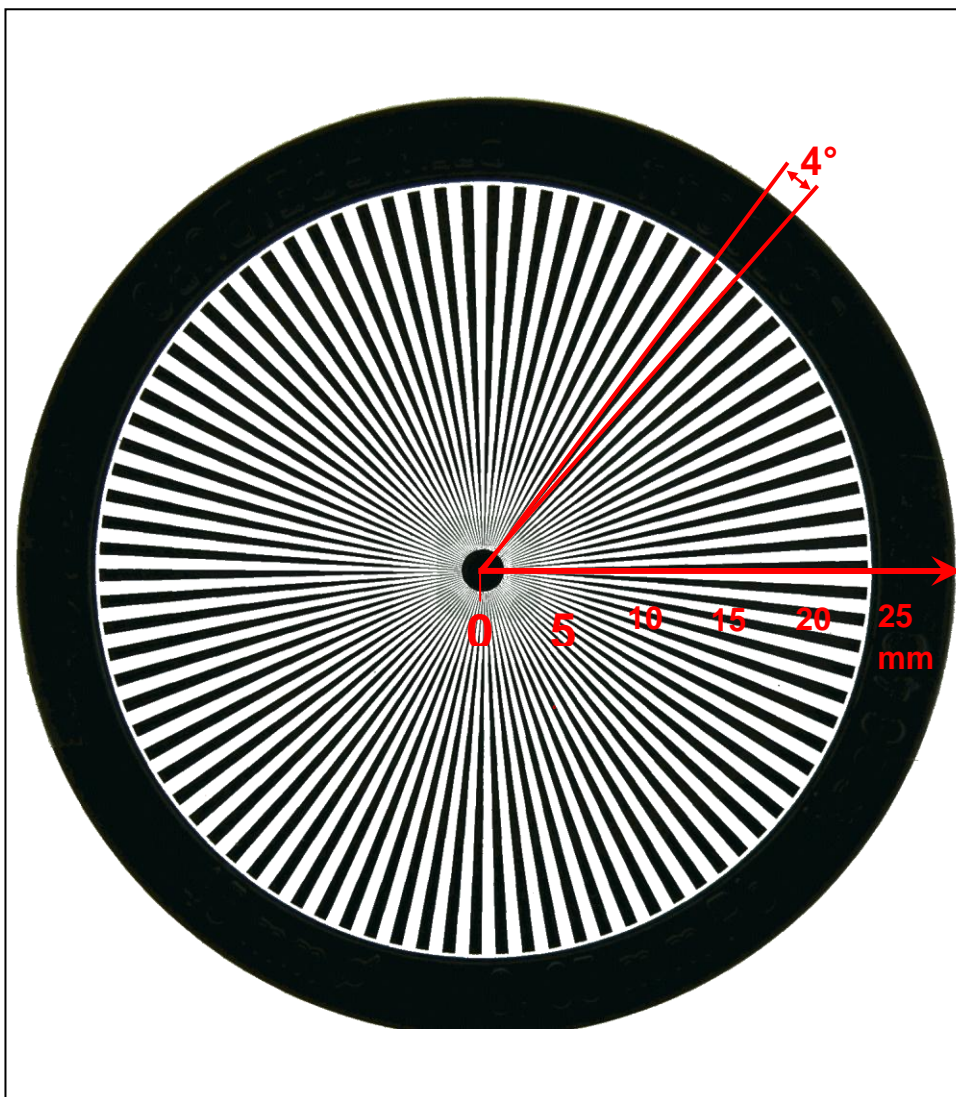


Testart: Sterntest  
 Nummer: PTW L659043  
 Dicke: 0.03 mm Pb  
 Durchmesser: 45mm  
 Sternwinkel(°/Linienpaar): 3°/Lp  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.85...17.36±0.02  
 Werte in Lp/mm: berechnet

Radius	22.5	15	10	5	2.5	1.5	1.1
Lp/mm	0.85	1.27	1.91	3.82	7.64	12.73	17.36

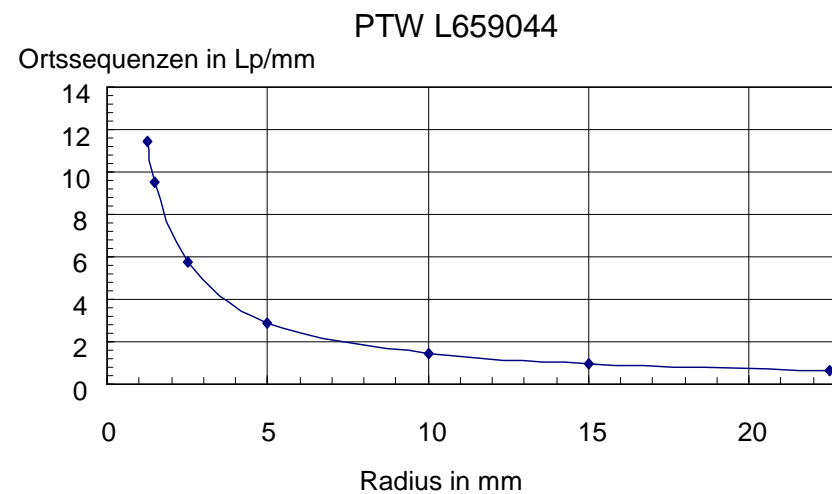


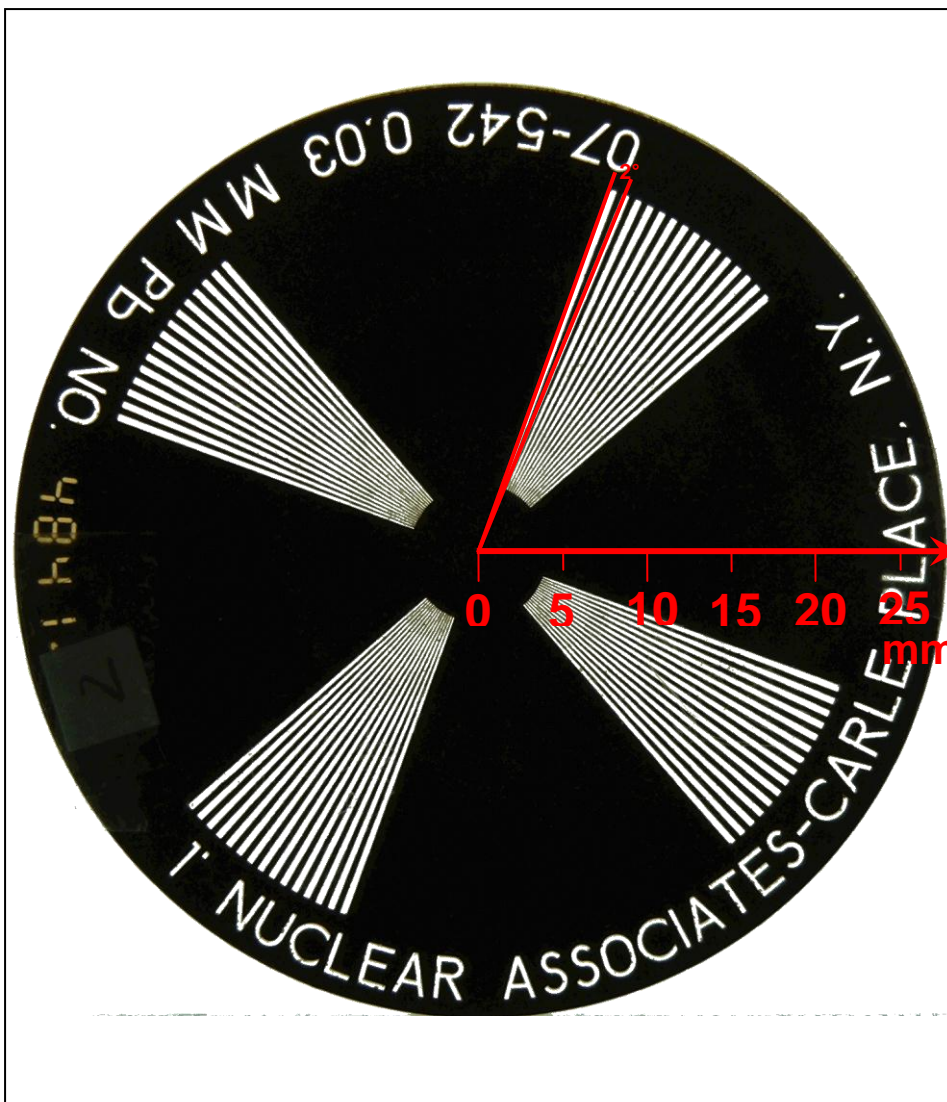




Testart: Sterntest  
 Nummer: PTW L659044  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Durchmesser: 45mm  
 Sternwinkel(°/Linienpaar): 4°/Lp  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.64...11.45±0.02  
 Werte in Lp/mm: berechnet

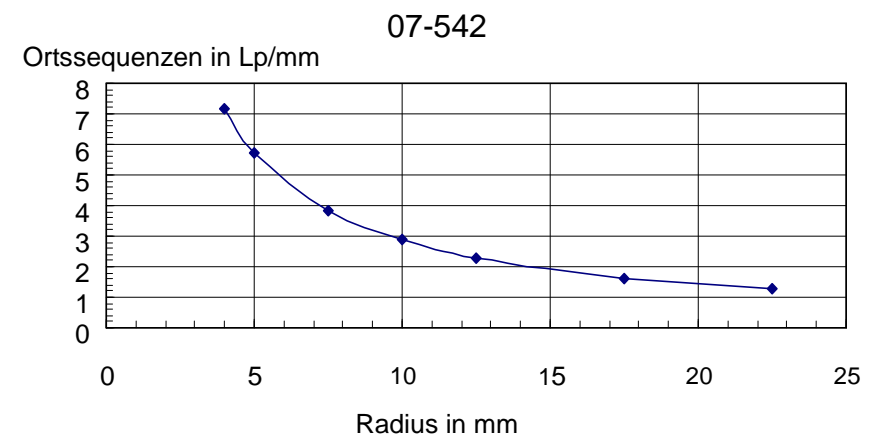
Radius	22.5	15	10	5	2.5	1.5	1.25
Lp/mm	0.64	0.95	1.43	2.86	3.73	9.55	11.45

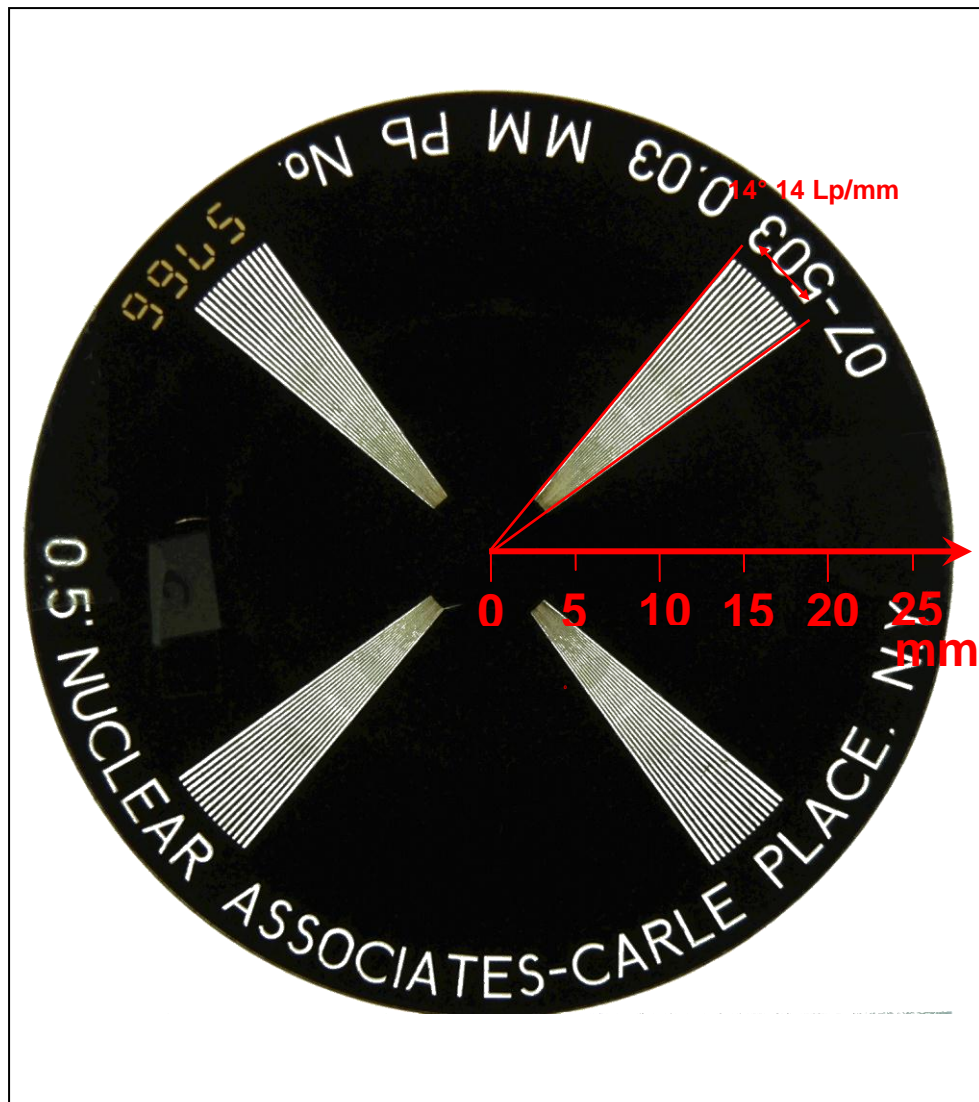




Testart: Sterntest  
 Nummer: 07-524  
 Dicke: 0.03 mm Pb  
 Durchmesser: 45mm  
 Sternwinkel(°/Linienpaar): 2°/Lp  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 1.27...7.16±0.02  
 Werte in Lp/mm: berechnet

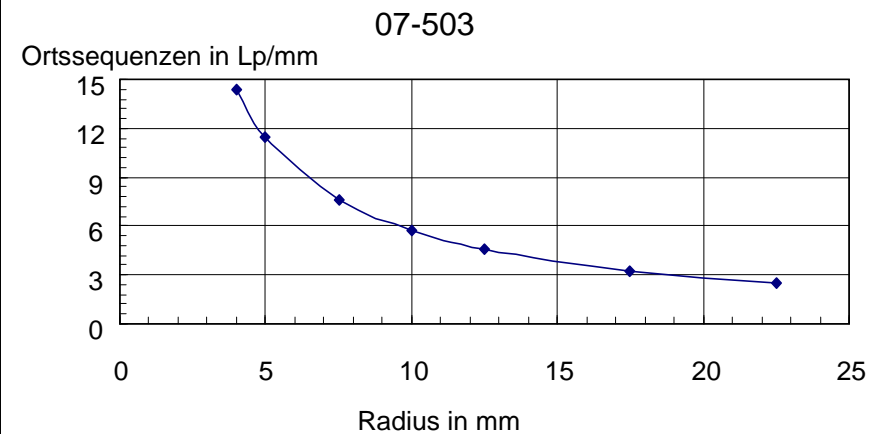
Radius	22.5	17.5	12.5	10	7.5	5	4
Lp/mm	1.27	1.64	2.29	2.86	3.82	5.73	7.16

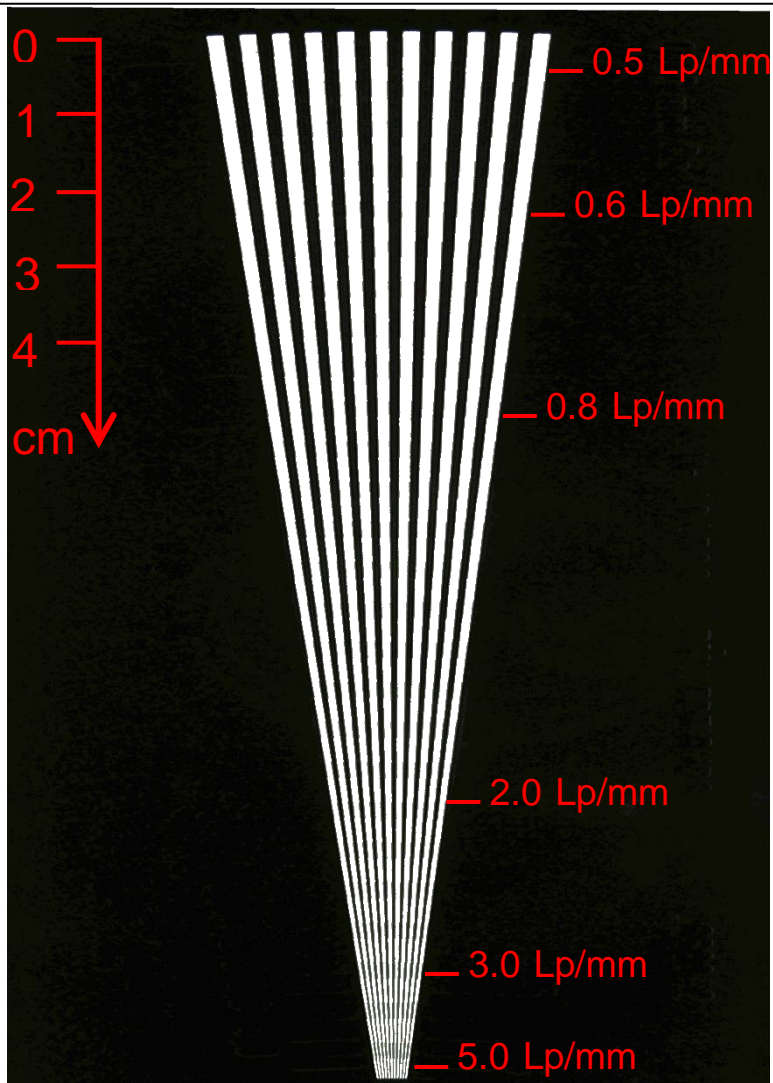




Testart: Sterntest  
 Nummer: 07-503  
 Dicke: 0.03 mm Pb  
 Durchmesser: 45mm  
 Sternwinkel(°/Linienpaar): 1°/Lp  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 2.55...14.32±0.02  
 Werte in Lp/mm: berechnet

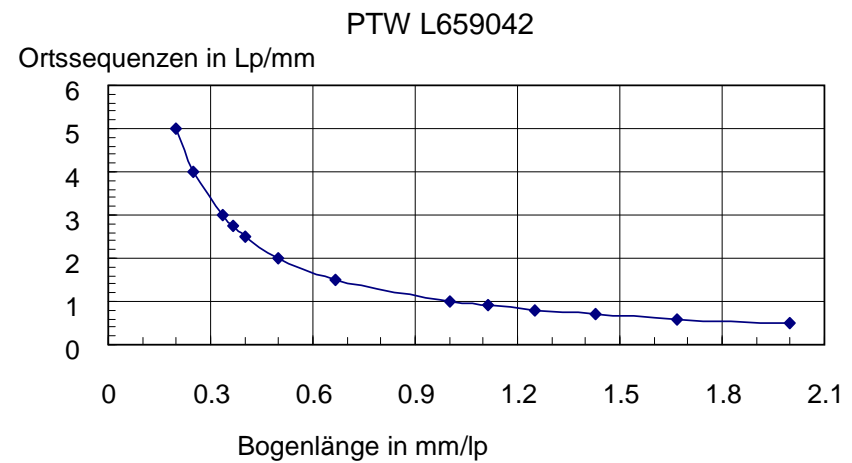
Radius	22.5	17.5	12.5	10	7.5	5	4
Lp/mm	2.55	3.27	4.58	5.73	7.64	11.46	14.32



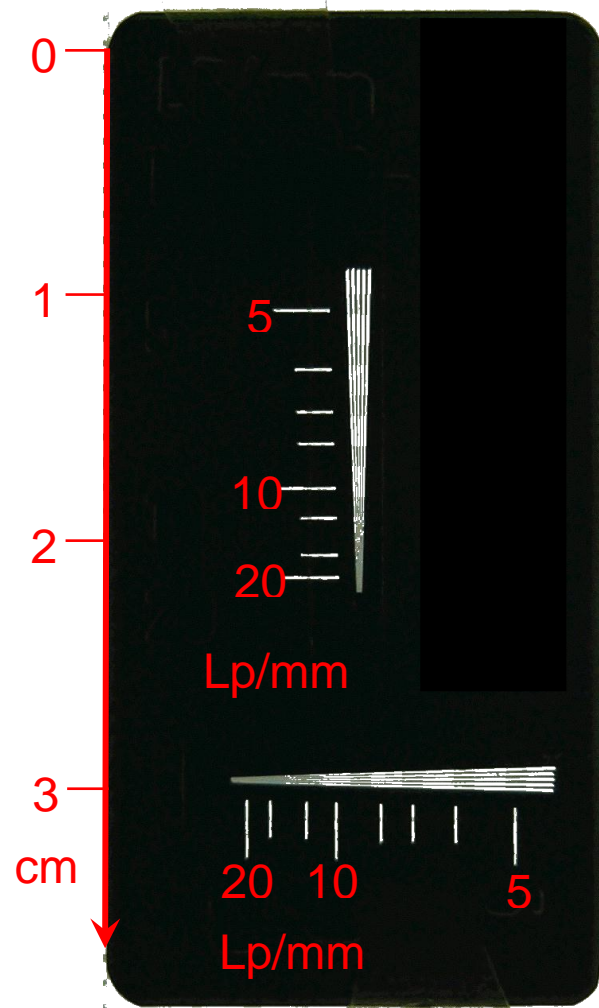


Testart: Besentest  
 Nummer: PTW L659042  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.4...5  
 Werte in Lp/mm: gekennzeichnet

0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	2.5	2.75	3.0	4.0	5.0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----



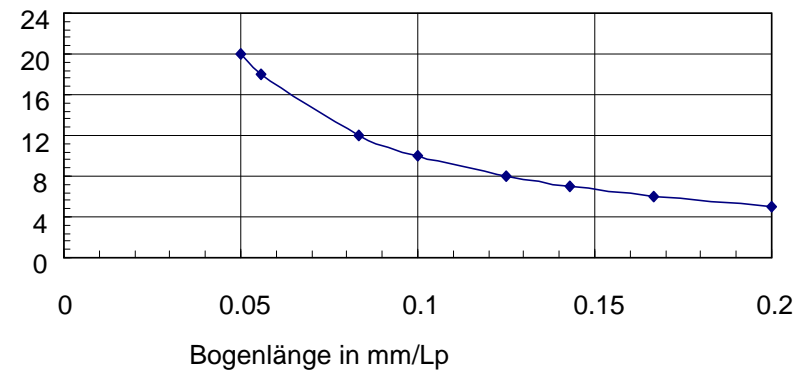


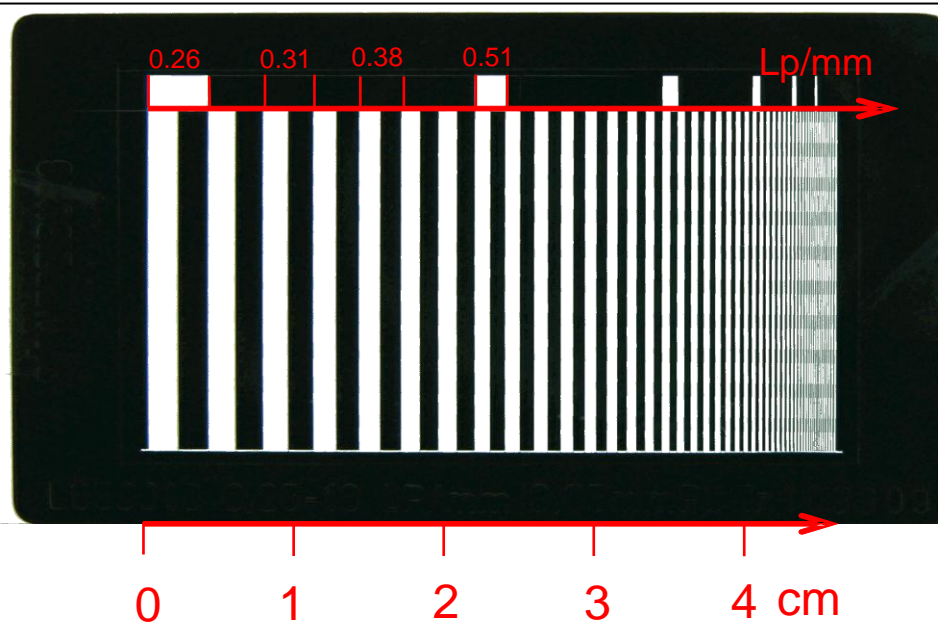


Testart: Besentest  
 Nummer: Type 39-2  
 Dicke: nicht gegeben  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 5...20  
 Werte in Lp/mm: gekennzeichnet

5	6	7	8	10	12	16	20
---	---	---	---	----	----	----	----

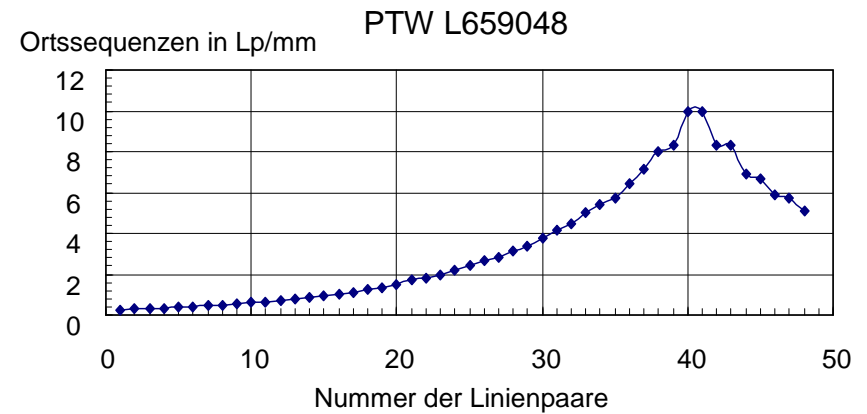
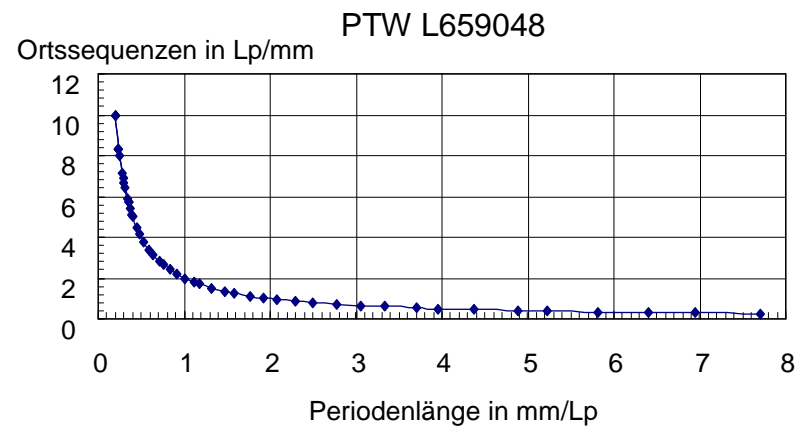
Ortssequenzen in Lp/mm Type 39-2

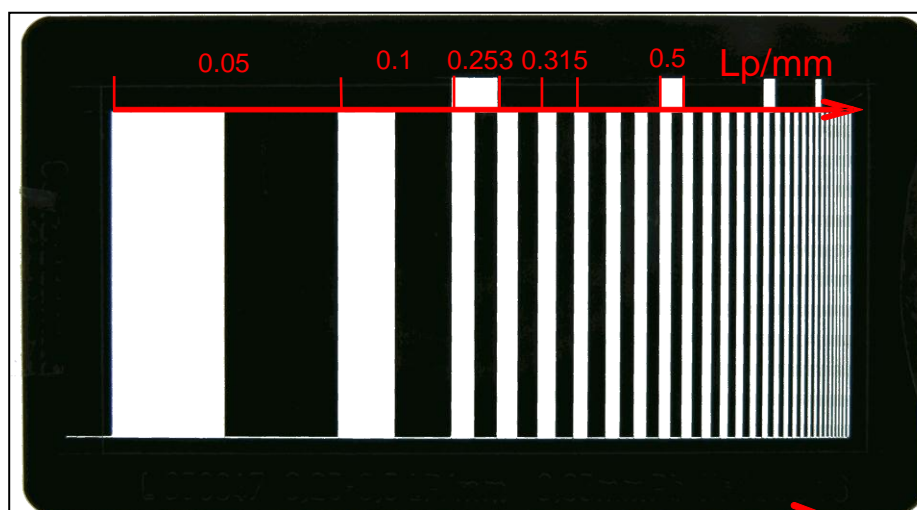




Testart: Linientest für einzelne Linienpaare  
 Nummer: PTW L659048  
 (Typ 52 bzw Vorläufer Typ 12 Funk)  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.25...10...5.2.  
 Werte in Lp/mm: gemessen  $\pm 0.02$

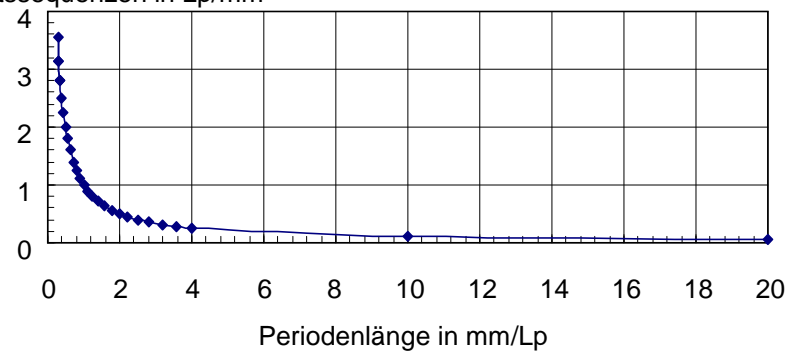
0.26	0.29	0.31	0.34	0.38	0.41	0.46	0.51	0.54	0.60
0.66	0.72	0.80	0.87	0.97	1.04	1.13	1.27	1.36	1.52
1.69	1.80	1.98	2.20	2.41	2.63	2.82	3.13	3.40	3.77
4.17	4.45	5.00	5.41	5.72	6.46	7.14	8.01	8.33	10.0
10.0	8.33	8.33	6.90	6.67	5.88	5.72	5.13		





PTW L659047

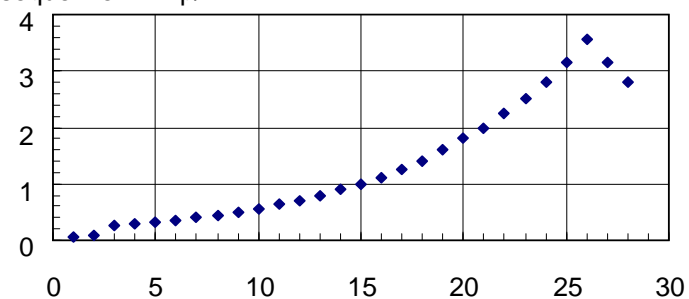
Ortssequenzen in Lp/mm

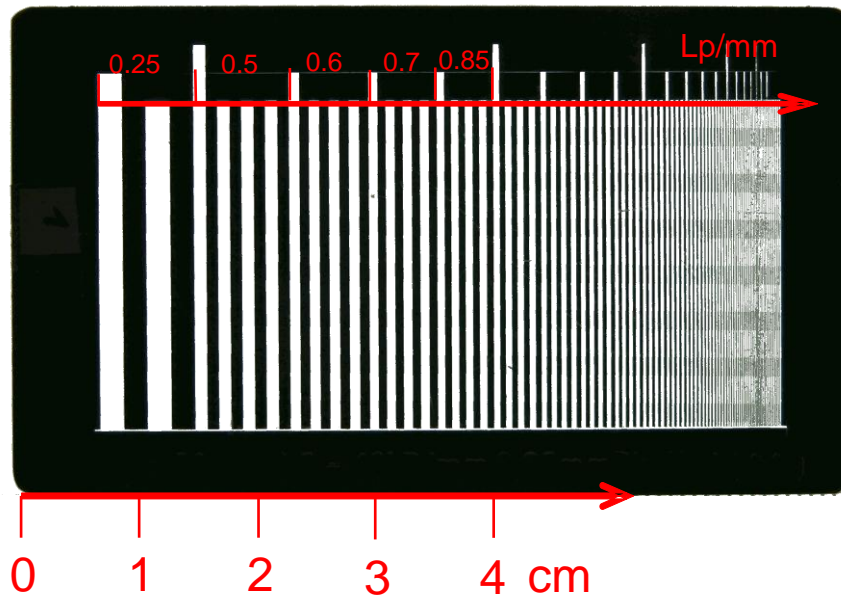


Testart: Linientest für einzelne Linienpaare  
 Nummer: PTW L659047 (Typ 54 Funk)  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.05...3.55  
 Werte in Lp/mm: angegeben von Funk

0.05	0.1	0.25	0.28	0.315	0.355	0.4
0.45	0.5	0.56	0.63	0.71	0.8	0.9
1	1.12	1.25	1.4	1.6	1.8	2
2.24	2.5	2.8	3.15	3.55	3.15	2.8

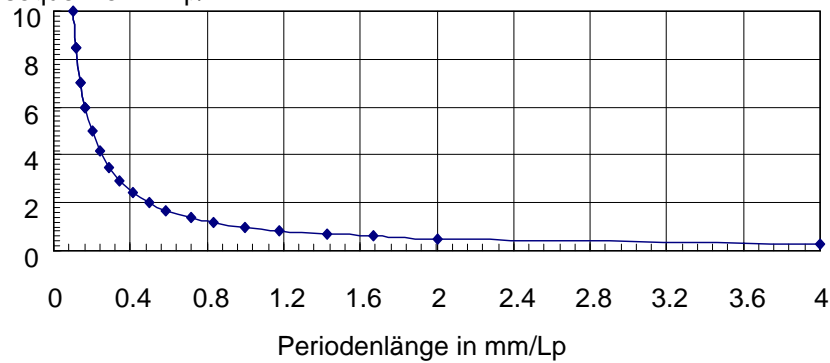
Ortssequenzen in Lp/mm PTW L659047





Typ 538

Ortssequenzen in Lp/mm

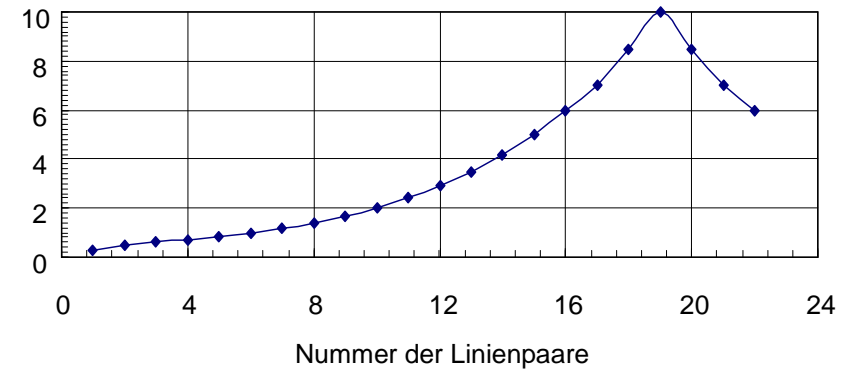


Testart: Gruppentest  
 Nummer: Typ 538 (Typ 52 Funk)  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.5...10  
 Werte in Lp/mm: angegeben von Funk

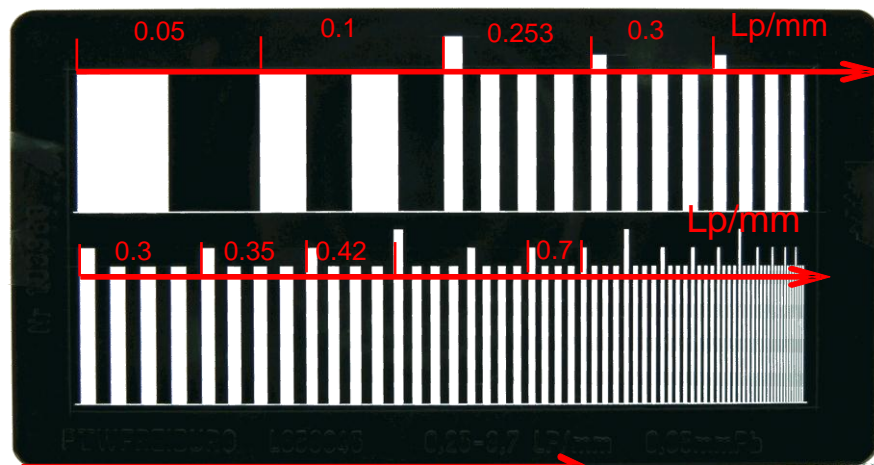
0.25	0.5	0.6	0.7	0.85	1	1.2	1.4
1.7	2	2.4	2.9	3.5	4.2	5	6
7	8.5	10	8.5	7	6		

Typ 538

Ortssequenzen in Lp/mm



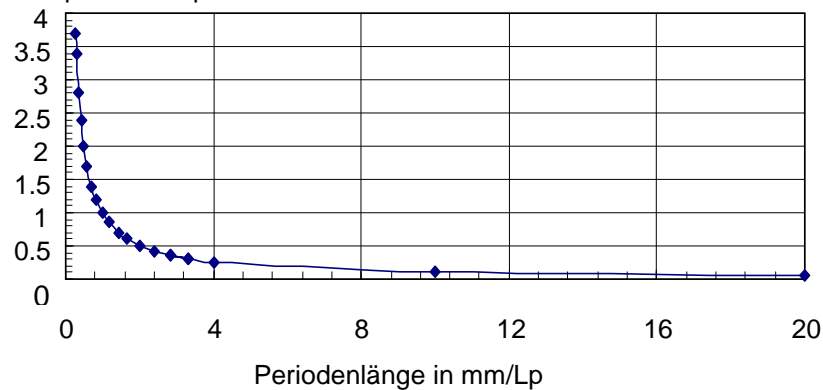




0 1 2 3 4 cm

PTW L659045

Ortssequenzen in Lp/mm



Testart:

Gruppentest

Nummer:

PTW L659045 (Typ 52 Funk)

Dicke:

0.05 mm Pb

Ortssequenzen in Lp/mm:

0.25...3.7

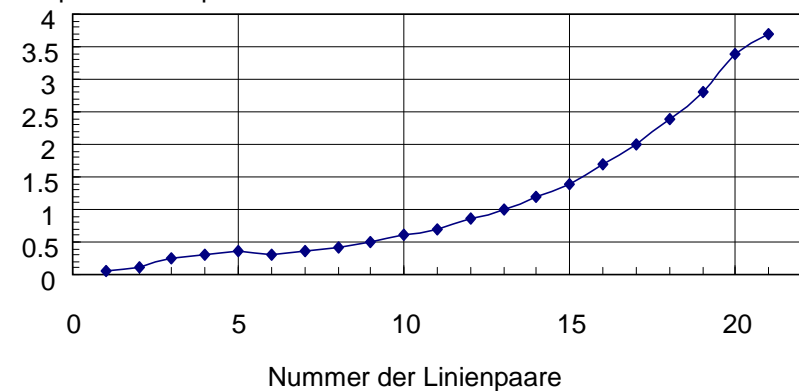
Werte in Lp/mm:

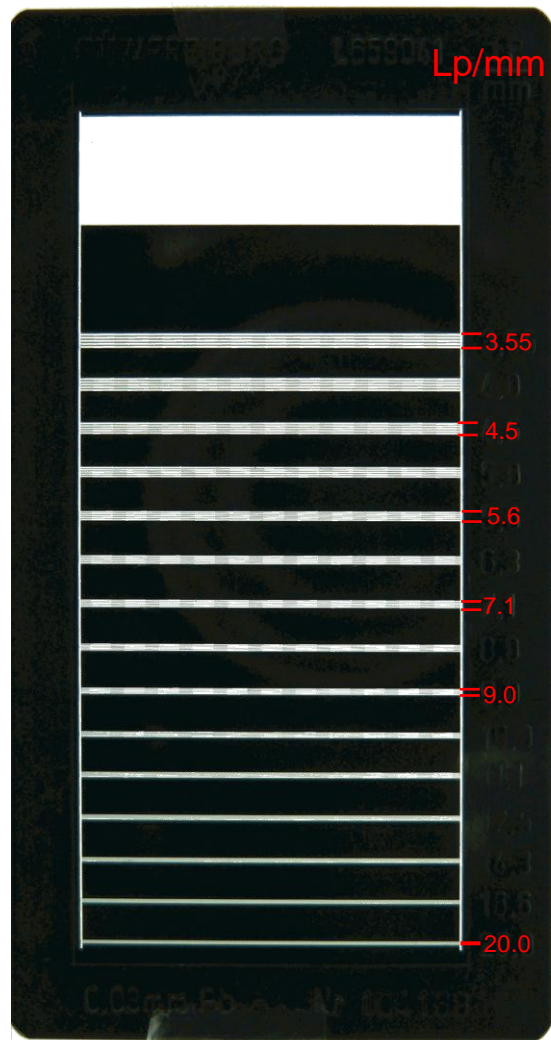
angegeben von Funk

0.05	0.1	0.25	0.3	0.35	0.3	0.35
0.42	0.5	0.6	0.7	0.85	1	1.2
1.4	1.7	2	2.4	2.8	3.4	3.7

PTW L659045

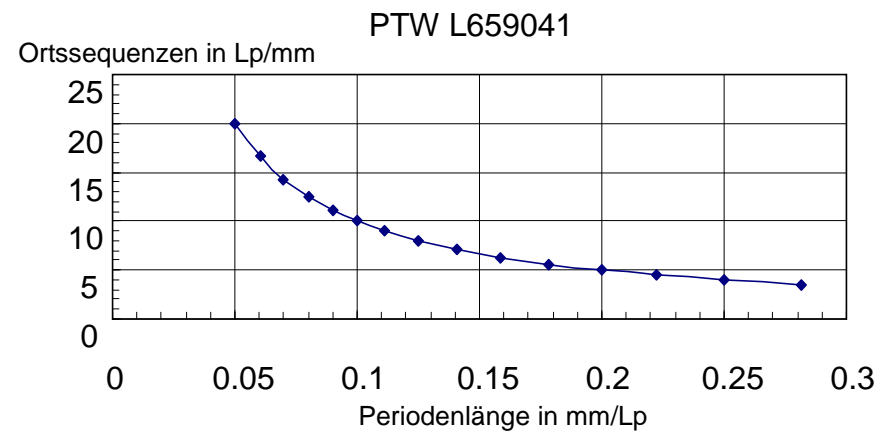
Ortssequenzen in Lp/mm

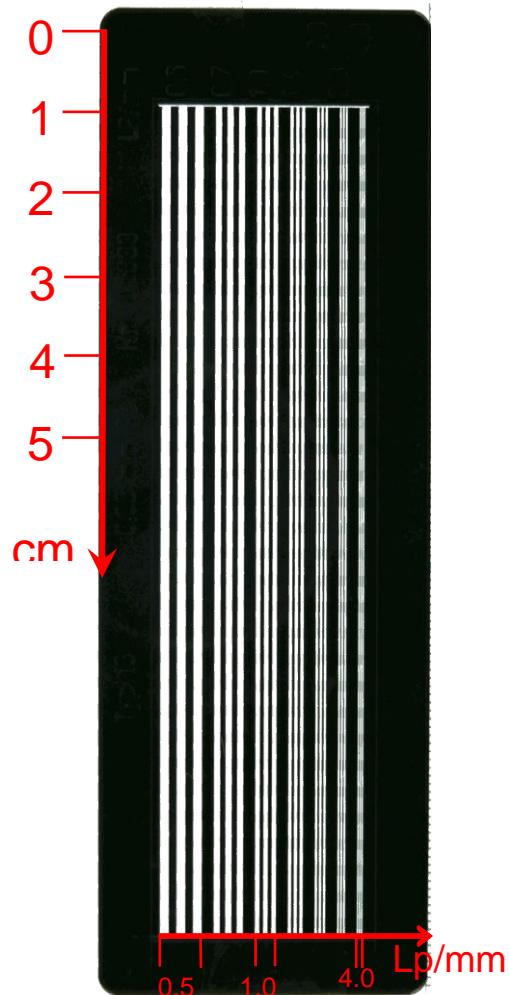




Testart: Gruppentest  
 Nummer: PTW L659041  
 Dicke: 0.03 mm Pb  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 3.55...20.0  
 Werte in Lp/mm: gekennzeichnet

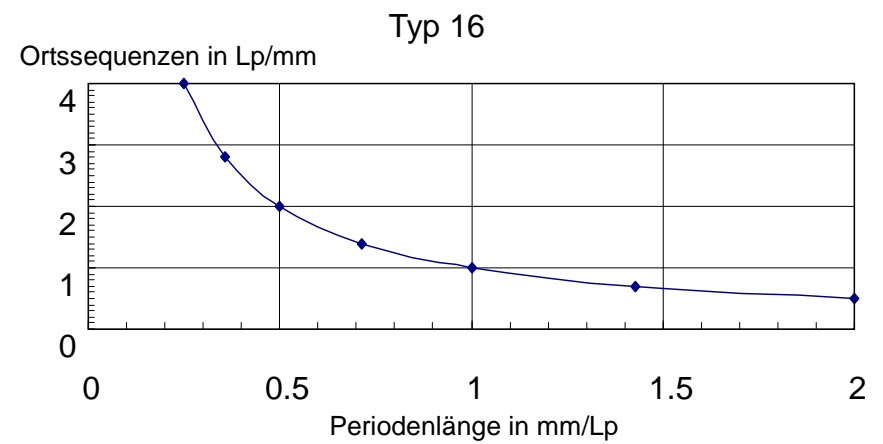
3.55	4	4.5	5	5.6	6.3	7.1	8
9	10	11.1	12.5	14.3	16.6	20	





Testart: Gruppentest  
 Nummer: Typ 16 Funk  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.5...4.0  
 Werte in Lp/mm: gekennzeichnet

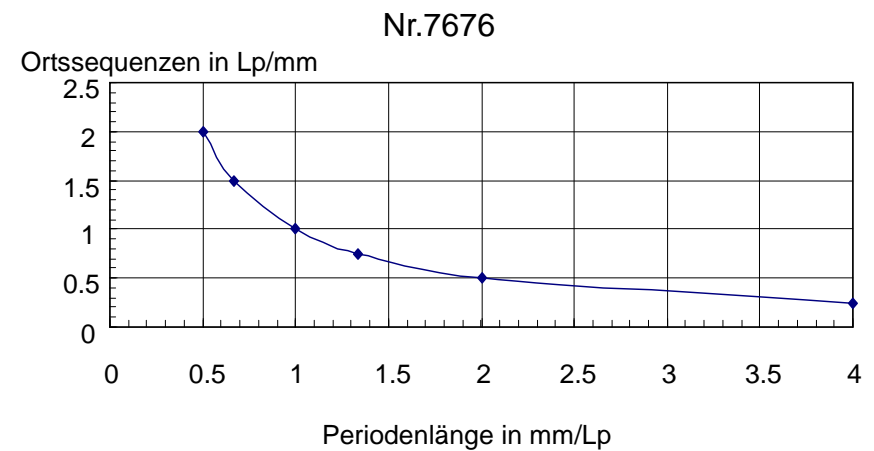
0.5	0.7	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----





Testart: Gruppentest  
 Nummer: Nr.7676  
 Dicke: 0.05 mm Pb  
 Ortssequenzen in Lp/mm: 0.25...2.0  
 Werte in Lp/mm: gekennzeichnet

0.25	0.5	0.75	1	1.5	2
------	-----	------	---	-----	---



## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorgelegte Diplomarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen erarbeitet habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt entnommenen Gedanken und Daten sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Ilmenau, den 30. Juli 2010

.....

Qiaoqiao Hu